

---

# Utilización del Gas Natural como Combustible en Navegación y en Puerto y su Sistema de Carga y Descarga

---

**Proyecto Final de Carrera | Licenciatura de Náutica y Transporte Marítimo**

---

**Autor: Jofre Enseñat Escobar**

DNI 41.503.916-W

**Director: Francesc Xavier Martínez de Osés**

Facultad de Náutica de Barcelona. UPC

Barcelona, 22 de marzo de 2011





## Índice

<b>1-Introducción</b>	pág. 9
 <b>2-Análisis de la problemática de la contaminación ambiental con origen en el transporte marítimo</b>	
2.1 Introducción	pág. 21
2.2 Emisiones contaminantes con origen en el transporte marítimo	pág. 24
2.3 Regulaciones de la OMI sobre emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)	pág. 28
2.4 Posición de la unión europea	pág. 29
2.5 Posibles enfoques de la mitigación de la contaminación con origen en el transporte marítimo	
2.5.1 Introducción	pág. 31
2.5.2 Mejoras en la tecnología y en el uso de la energía	pág. 33
2.5.3 Medidas Operacionales	pág. 35
2.5.4 Programas basados en el mercado	pág. 35
2.5.5 Cuestiones Energéticas	pág. 36
2.6 Iniciativa del Port de Barcelona	pág. 37
 <b>3- Propiedades del gas natural licuado (LNG)</b>	
3.1 Propiedades físicas y composición del LNG	pág. 41
3.2 Inflamabilidad de mezclas de metano, oxígeno y nitrógeno	pág. 46
3.3 Comportamiento del LNG en los tanques de carga	pág. 51

3.4 *Sloshing*-movimiento libre del líquido en los tanques pág. 52

3.5 Gas natural y medio ambiente pág. 53

## **4-Descripción del equipamiento y sistema de carga y descarga de un buque metanero**

### 4.1-Sistema de líneas relacionadas con la carga

4.1.1 Descripción General pág. 59

4.1.2 Línea de Líquido pág. 65

4.1.3 Línea de Vapor pág. 66

4.1.4 Línea de Reachique / Enfriamiento pág. 67

4.1.5 Línea de Gas – Operación en un único tanque pág. 68

4.1.6 Línea de Vapor / Gas a la Máquina pág. 69

4.1.7 Línea de Venteo pág. 69

4.1.8 Línea de Gas Inerte / Aire Seco pág. 71

### 4.2 Equipamiento de los tanques de carga

4.2.1 Descripción General pág. 72

4.2.2 Bombas en los Tanques de Carga pág. 74

4.2.3 Bombas Principales de Carga pág. 74

4.2.4 Bombas de Reachique / Enfriamiento pág. 76

4.2.5 Bomba de Carga de Emergencia pág. 78

### 4.3 Operaciones relacionadas con la carga

4.3.1 Inertado de los Espacios de Aislamiento pág. 79

4.3.2 Inertado de los Tanques de Carga pág. 81

4.3.3 Puesta en Gas de los Tanques de Carga pág. 82

4.3.4 Enfriamiento de los Tanques de Carga pág. 84

4.3.5 Viaje en Lastre pág. 86

4.3.6 Operación de Carga del Buque pág. 90

4.3.7 Viaje en Carga Quemando el *Boil-Off* en las Calderas pág. 94

4.3.8 Descarga del Buque con Gas Retornado de Tierra pág. 99

## **5-Presencia del gas natural como combustible propulsivo para motores auxiliares en puerto y como alternativa a los derivados del petróleo**

5.1 Introducción pág. 117

5.2 Antecedentes históricos. primeros modelos

5.2.1 Antes del año 2000 pág. 119

5.2.2 A partir del año 2000 pág. 120

5.3 Alternativas de propulsión para buques LNG con motores diesel pág.124

5.4 Consideraciones especiales derivadas  
del uso de gas natural como combustible pág. 127

5.5 Ejemplos de sistemas propulsivos a gas

5.5.1 Los motores duales Wärtsilä en la propulsión de gaseros pág. 128

5.5.2 La aportación de Rolls-Royce a los motores de gas pág. 131

5.6 Plantas de relicuefacción del *boil-off* pág. 134

5.7 Motores auxiliares a gas pág. 136

5.8 Compromiso de Repsol-gas natural LNG  
con este nuevo tipo de buques metaneros pág. 141

5.9 Normativa de aplicación en el diseño y  
construcción de sistemas que contengan gas natural pág. 144

**6-Conclusiones** pág. 148

## **7-Referencias bibliográficas**

7.1 Monografías pág. 159

7.2 Referencias on-line pág. 160



## CAPÍTULO 1

### **Introducción**



Vista aérea del LNG/C Madrid Spirit (Fuente: Teekay Shipping Gas IV, S.L.)



El transporte de gas natural licuado representa una pequeña parte de la industria marítima, sin embargo, por diferentes razones que trataremos de resumir, es una parte muy importante del negocio marítimo mundial. Comparado con el resto del negocio marítimo, que es tan antiguo como la más antigua de las civilizaciones, el transporte marítimo de gas licuado es muy reciente. Debemos remontarnos únicamente 50 años atrás para encontrar la aparición del primer buque dedicado al transporte de Gas Natural Licuado (LNG), el “Methane Pioneer”. Hoy en día, el LNG se ha convertido en una de las fuentes de energía menos contaminantes (a pesar de ser no-renovable) y de uso más extendido en todo el mundo. De este hecho se deriva su gran importancia dentro del entorno energético actual.

En el presente trabajo, pretendemos analizar la posibilidad de utilizar este combustible para el funcionamiento del buque durante su estancia en puerto y, adicionalmente, dar a conocer el funcionamiento del sistema de carga y descarga de un buque metanero, así como todos los elementos que intervienen en él.

Por otro lado, también nos aproximaremos al metano (componente mayoritario del LNG) y daremos una visión del interesante negocio del transporte marítimo de gas natural licuado.

Siendo el transporte marítimo responsable de una parte importante de las emisiones contaminantes que afectan a nuestro planeta, al igual que en el sector industrial, el gas natural podría contribuir a reducir de forma muy notable su impacto.

Dentro de las alternativas previstas tanto por la Unión Europea como por la Organización Marítima Internacional, se encuentra la utilización de combustibles alternativos a los actuales derivados del petróleo que posean unas mejores características medioambientales; Destaca entre todos ellos el gas natural por sus despreciables emisiones de óxidos de azufre, mínimas emisiones de óxidos de nitrógeno y ausencia de partículas en suspensión.

La legislación vigente es muy restrictiva y exige el uso de combustibles con un contenido de azufre menor al 0,1% en puerto para estancias de más de dos horas. El difícil cumplimiento de esta normativa podría ver una salida mediante el desarrollo de iniciativas que prevean la utilización de gas natural en puerto.

La alternativa que el gas natural supone a los combustibles derivados del petróleo se ha demostrado viable recientemente mediante la incorporación de motores de combustión interna que usan LNG como combustible en grandes buques, pero más allá de este hecho creemos que el LNG puede suponer una alternativa a la utilización de gasoil por parte de los motores auxiliares de los buques durante sus estancias en puerto, lo que permitiría disminuir las emisiones contaminantes y mejorar de esta manera los índices de polución atmosférica de las ciudades portuarias, avanzando en el cumplimiento de las normativas medioambientales tanto locales como internacionales que son cada vez más estrictas.

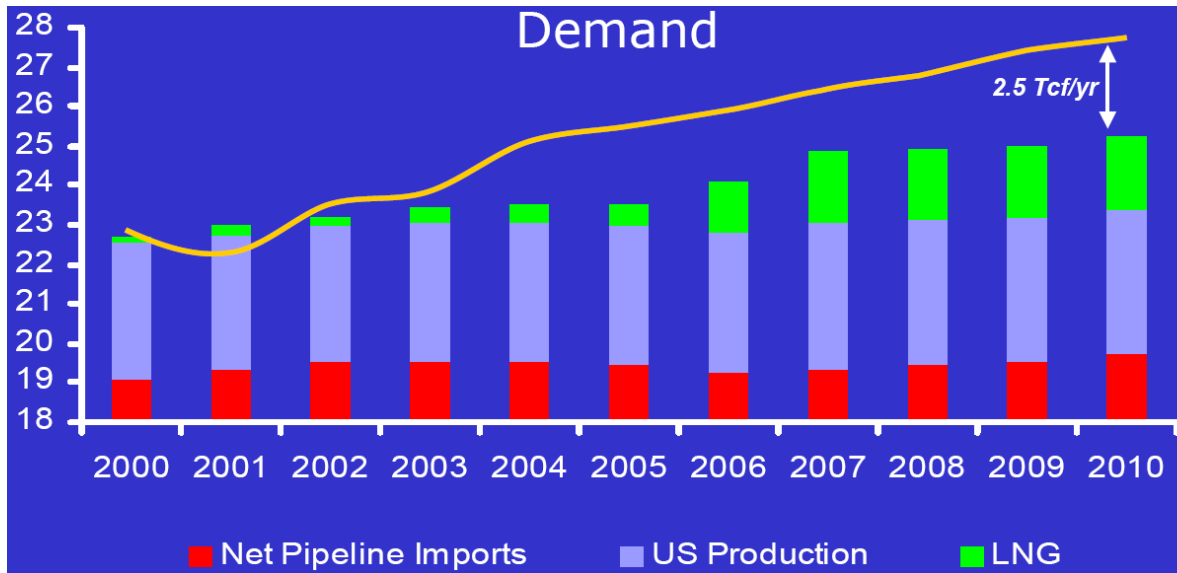
La industria del gas natural esta creciendo a fuerte ritmo en todo el mundo. Las reservas mundiales de gas natural han superado recientemente las reservas de petróleo, y se espera que en el año 2020 el consumo de gas supere al de petróleo. Prácticamente cada día se descubren nuevas reservas de gas natural. Las reservas probadas llevan creciendo sin parar desde 1980, y la suma de todos estos descubrimientos sitúa la oferta muy por encima del consumo previsto. El problema, pues, no consiste tanto en encontrar gas sino en establecer sistemas para transportarlo hasta los puntos de consumo. Ello explica que el transporte marítimo de gas natural licuado este creciendo a un ritmo del 10% anual.

En lo referente a la flota mundial de metaneros, en el presente año 2011, esta se sitúa alrededor de los 350 buques, mientras que se espera que crezca por encima de las 500 unidades en el periodo comprendido entre el 2011 y el 2020. Respecto a las tripulaciones, actualmente contamos con 3.500-4.000 oficiales trabajando en este tipo de buques, mientras que se espera que este número alcance los 5.500 hacia el año 2020.

La fortaleza de este sector se ve reflejada en que, a diferencia de lo que pasaba en el pasado, actualmente los armadores pueden firmar contratos de fletamento a largo plazo. Este es el caso del LNG/C Madrid Spirit que está ligado a Repsol YPF mediante un contrato de fletamento por tiempo de 20 años de duración.

La demanda de Gas Natural Licuado ha aumentado de forma continua en los últimos años y un ejemplo lo representa la imagen siguiente correspondiente a Estados Unidos:





Demanda vs Producción e Importación de LNG. [Tcf/yr: Trillones de pies cúbicos por año]

(Fuente: US Energy Information Administration)

Con el aumento de buques gaseros y el crecimiento de la producción de gas se intenta dar respuesta a la demanda actual, sin embargo, el número de plantas regasificadoras no ha crecido al mismo ritmo originándose así un déficit en la capacidad de regasificación a nivel mundial.

Al mismo tiempo crece, como es lógico, la demanda de buques especializados en este tipo de transporte y, cada día más, se incorporan a los mismos nuevos elementos que los convierten en buques muy especializados. Un ejemplo lo podemos encontrar en buques como el “LNGRV1 Excelsior” o el “LNGRV Excelerate”, gestionados por la empresa Exmar que se encuentran atracados alternativamente en “Puerto Galván”, Bahía Blanca (Argentina), y al estar dotados de una planta de regasificación en su castillo de proa, actúan como planta de regasificación para gran parte del consumo energético argentino, representando una solución real al problema comentado en el párrafo anterior.

<sup>1</sup> LNGRV: *Liquefied Natural Gas Regasification Vessel*.



Vista del "LNGRV Excelsior" donde podemos ver su planta de regasificación. (Fuente: Jofre Enseñat)

Los LNG/C (Liquified Natural Gas Carrier) presentan unas características muy singulares, que los convierten en unos buques muy caros en su construcción y explotación posterior. Aunque la diversidad en los costes de construcción es muy grande en función del lugar del mundo donde se realice. Un claro ejemplo lo constituyen los buques gaseros contruidos en España en el año 2004 cuyo coste alcanzó los 200 millones de dólares aproximadamente mientras que buques de las mismas características se construían en Corea en la mitad de tiempo y por un coste que superaba ligeramente los 100 millones de dólares.

Los LNG/C o metaneros (como también se los conoce), tienen un peso muerto reducido en relación a sus dimensiones. La razón de este hecho es que el peso específico del metano líquido es aproximadamente la mitad que el del petróleo crudo. Además, una parte considerable del casco esta ocupada por los tanques de lastre y por el aislamiento de los tanques de gas. Son buques, pues, con mucha obra muerta, lo que dificulta su maniobrabilidad, sobre todo en presencia de viento y en puerto, aunque el comportamiento de los mismos en navegación es excelente.

Una clasificación muy habitual de los buques metaneros y que nos da una idea de su evolución en el tiempo referente a sus dimensiones y capacidad de carga lo representa la siguiente tabla:

Denominación	Dimensión
Medmax	75.000 m3
Conventional LNG/C	125.000-145.000 m3
New Conventional Size	155.000-170.000 m3
Q-Flex	216.000 m3
Q-Max	265.000 m3

El peligro potencial que existe en el acto de transportar un líquido a estas temperaturas tan bajas y la enorme inversión que supone llevar a cabo la construcción de un buque que transporte gas natural licuado requiere un firme compromiso con la seguridad y la fiabilidad. Este hecho y el reconocimiento de que cualquier fallo en la estructura del buque o un error humano podría llevar a unas graves consecuencias y que la información generada por cada incidente debía darse a conocer para evitar futuros accidentes, impulsan la aparición de la Society of International Gas Tanker and Terminal Operators (SIGTTO) en 1979. La SIGTTO es una organización sin ánimo de lucro formada para promover los más altos estándares operacionales y las mejores prácticas en los buques que transportan gas y en las terminales alrededor del mundo. Esta organización da apoyo técnico a sus miembros y representa sus intereses mutuos en aspectos técnicos y operacionales.

A pesar de lo indicado anteriormente, cabe señalar que los metaneros son unos buques extraordinariamente seguros, no habiéndose registrado ningún accidente grave en los mismos. Además, los pocos metaneros desguazados lo han sido por consideraciones comerciales a pesar de su longevidad, como es el caso de *Laietà* que fue entregado en 1970 y que sirvió en la ruta Argelia-España hasta el verano de 2008, momento en que fue vendido por Marítima del Norte por 13,5 millones de dólares (unos 10 millones de euros) para que fuera desguazado y convertido en chatarra en la India.

Todos los LNG son buques relativamente rápidos, dotados de una velocidad de servicio normalmente superior a 18 nudos (un ejemplo lo representa el *Madrid Spirit* que es capaz de superar los 22 nudos a plena carga en condiciones

favorables y cuya velocidad de flete son 18,5 nudos); Además, el metano vaporizado (*boil-off*) que continuamente se genera dentro de los tanques de carga puede ser utilizado como combustible en las calderas. Por ello, los metaneros son el último reducto de las instalaciones de vapor, ya que las calderas que alimentan de vapor a las turbinas pueden quemar tanto metano como fuel.

Hay que tener en cuenta que las sociedades de clasificación exigen que los buques que transportan cargas a menos de  $-10^{\circ}\text{C}$  dispongan de una barrera secundaria, que puede ser el casco si la temperatura de la carga no es inferior a  $-55^{\circ}\text{C}$ . Esta barrera secundaria debe ser capaz de contener toda fuga prevista de líquido durante 15 días.

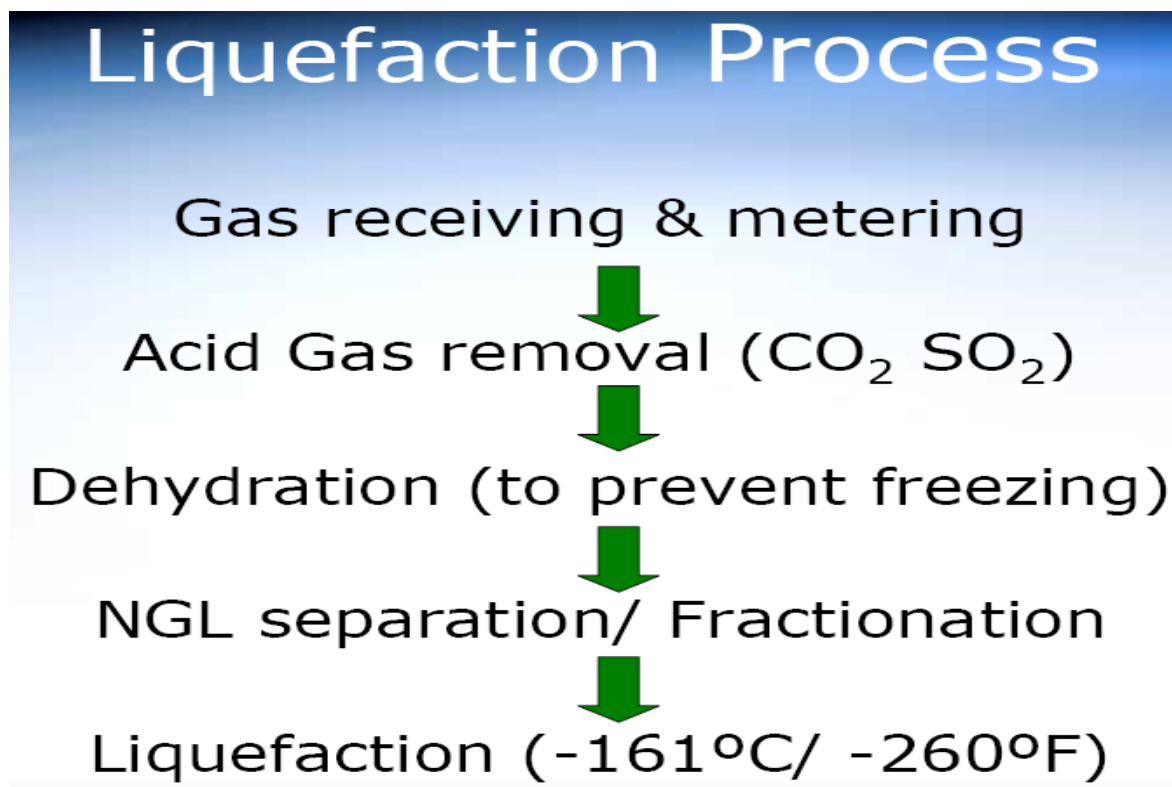
Además, los gaseros deben situar mamparos longitudinales en los costados del buque cuando la temperatura es inferior a  $-55^{\circ}\text{C}$ . Los metaneros que transportan su carga a  $-163^{\circ}\text{C}$ , deben tener por lo tanto, doble casco íntegro. Este último es el caso del LNG/C Madrid Spirit, buque al que nos referiremos en diferentes ocasiones en el presente trabajo.

Para conservar el gas licuado a esa temperatura, los LNG disponen de un aislamiento (obligatorio para cargas transportadas a menos de  $-10^{\circ}\text{C}$ ), que tiene dos misiones fundamentales: por una parte limita la transferencia de calor entre la atmósfera y los tanques de carga, previniendo la evaporación del gas; y además aísla el casco de acero de las contracciones y dilataciones que provoca la temperatura del gas ( $-163^{\circ}\text{C}$ ).

Hay que tener en cuenta que muy pocos LNG (a diferencia de los LPG) dispone de sistema criogénico para volver a licuar el gas natural vaporizado, por lo que la eficacia del aislamiento es muy importante. Se necesitaría una potencia de 2.200 Kw/h (un turbo generador tipo de cualquier LNG) para licuar 2,5 Tm/h, lo que hace económicamente poco viable esta posibilidad, aunque se está trabajando seriamente en este sentido. Un ejemplo lo representan los nuevos gaseros de gran tamaño que se han puesto recientemente en funcionamiento y que prácticamente doblan la capacidad de carga del LNG/C Madrid Spirit, y que han sido dotados de motores de combustión interna que pueden usar tanto metano como fuel como combustible. La aparición de estos sistemas de propulsión se debe a que las turbinas, que son el medio de propulsión actual, requieren del uso

de calderas cuya eficiencia es muy baja. Esto era un problema relativamente pequeño mientras no podíamos relicuar el gas metano que se generaba de forma natural en los tanques y que quemábamos en las calderas o de otra forma se ventaba, pero con el desarrollo de las técnicas de relicuado a bordo se abre la posibilidad de devolver este gas generado a los tanques de carga de manera que el ahorro es evidente, ya que la eficiencia de los motores de combustión interna, es mucho mayor que el de las calderas.

Este sistema se ha implantado ya en algunos de los grandes gaseros que han aparecido recientemente en el mercado y aunque todavía presentan algunos problemas de fiabilidad, todo apunta a que se convertirán en una alternativa muy importante a las turbinas, ya que el rendimiento de un motor se vuelve especialmente importante en aquellos momentos en que el precio del gas es elevado. Una de las características de los LNG es que pueden utilizar la carga como combustible, siempre que el fletador así lo autorice y no lo limite al Boil-off natural y esta característica se sigue manteniendo en los nuevos buques.

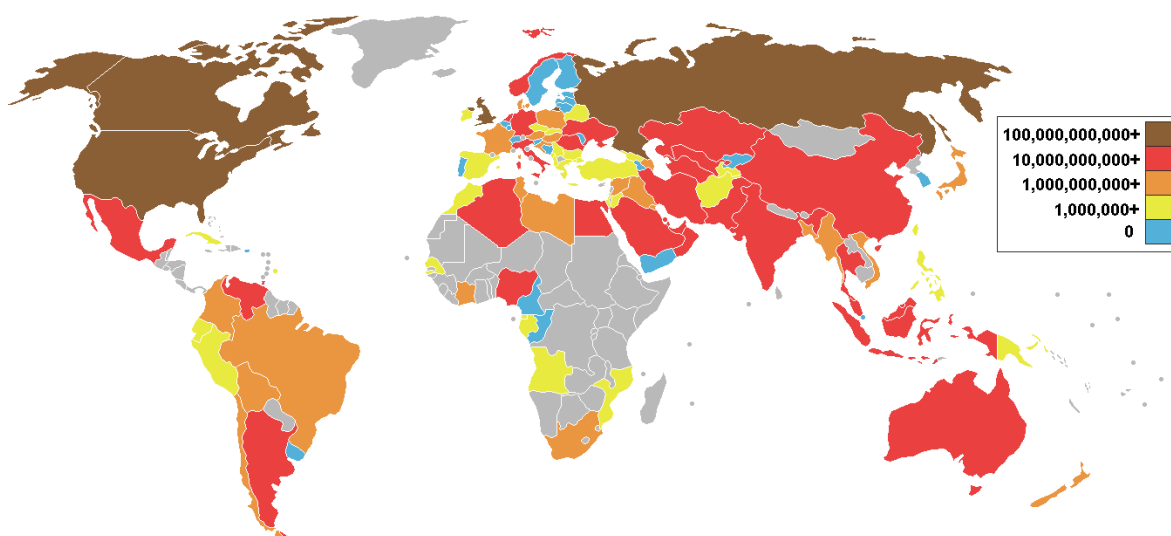


Esquema del Proceso de relicuado. (Fuente: The Oxford Princeton Programme)

La naviera Knutsen OAS ha sacado en el presente año 2010 buques con estos sistemas de propulsión alternativos. Son metaneros que presentan máquinas capaces de desarrollar potencias de más de 100.000 Hp y que representan sólo un ejemplo de la innovación en los diseños y desarrollos tecnológicos de estos buques, los sistemas de contención de gas que incorporan, los sistemas de tratamiento y manejo de la carga, los sistemas de propulsión (con alternativas muy interesantes a la turbina de vapor como hemos comentado anteriormente) y en los equipos electrónicos que permiten operar estos buques de manera más sencilla y segura.

Es en este punto en el que la posibilidad de que los motores auxiliares de este tipo de buques funcionen también con metano es una realidad que debemos considerar seriamente, mediante la cual podríamos disminuir considerablemente las emisiones de óxidos nitrosos (NOx), así como de compuestos sulfurosos, sustancias presentes en los productos de la combustión de fueles y gasóleos y prácticamente inexistentes en la quema de gas natural.

De la correcta valoración de este hecho podríamos desarrollar infraestructuras en los puertos para permitir al resto de buques conectarse durante sus estancias en puerto y obtener el gas natural de tierra y alimentar de esta manera sus motores auxiliares. Esto sería especialmente factible en una etapa inicial para aquellos buques cuyas rutas sean fijas i recalaran con frecuencia en puertos que dispusieran de este servicio.



Producción Mundial de Gas Natural [en m³]. (Fuente: <https://www.cia.gov>)

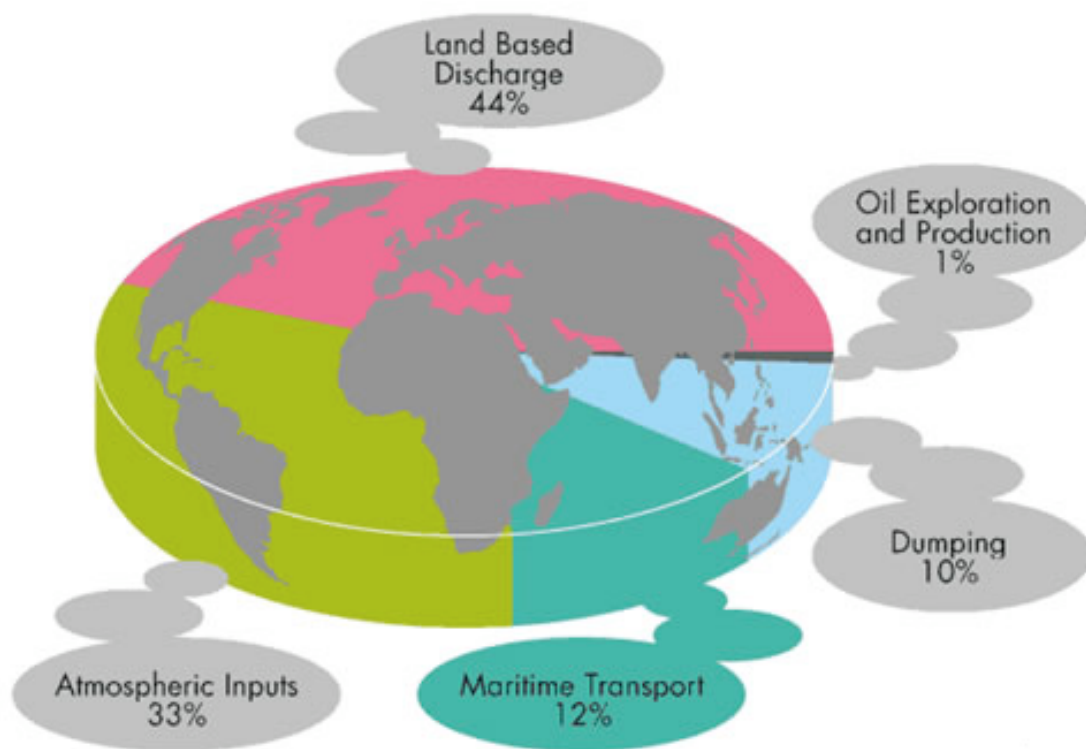
Finalmente, creo que es importante subrayar la importancia de esta fuente de energía señalando que la misma representa aproximadamente un cuarto de toda la energía consumida en el mundo cada año. Así mismo, su localización es muy diversa alrededor de todo el planeta, de aquí la importancia de su transporte por mar y de las rutas marítimas que se están haciendo navegables cada vez durante más meses al año como son el paso del Noreste y del Noroeste que nos permitirían alcanzar latitudes muy grandes que antes eran prácticamente inalcanzables al estar cubiertas de hielo durante prácticamente todos los meses del año. En la imagen anterior podemos ver como las zonas de mayor producción de Gas Natural se sitúan en latitudes muy septentrionales.





## CAPÍTULO 2

### **Análisis de la problemática de la contaminación ambiental con origen en el transporte marítimo**



**Marine Pollution Chart**

Distribución de la contaminación según origen (Fuente: <http://saferenvironment.wordpress.com/>)



## **2.1 Introducción**

El análisis de la problemática de la contaminación ambiental con origen en el transporte marítimo es una cuestión que en los últimos años ha tomado una especial relevancia y los estados ribereños, así como las organizaciones supraestatales están desarrollando paquetes legislativos cada vez más restrictivos en lo referente a las emisiones contaminantes desde los buques. Especialmente durante sus estancias en puerto o durante su navegación costera.

En este sentido, los estados prevén el establecimiento de normas que regulen o penalicen las elevadas tasas de emisión de CO<sub>2</sub>, así como óxidos nitrosos o compuestos sulfurosos.

Actualmente, en algunos buques existen tanques destinados al almacenamiento de fueles especiales con un contenido de azufre bajo que se utilizan durante la estancia o navegación de estas naves por zonas de especial sensibilidad ambiental.

Como hemos comentado anteriormente, otros buques de nueva construcción han incorporado el gas natural como combustible para sus máquinas principales. La motivación de este hecho es puramente económica, ya que en épocas en que el LNG tiene un precio elevado, el ahorro es considerable. No obstante, esta alternativa, no sólo nos permite consumir menos combustible sino que de forma indirecta también contribuye a disminuir las emisiones contaminantes, ya que los productos de la combustión del metano son fundamentalmente CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, mientras que los óxidos de azufre, los óxidos nitrosos y sustancias sólidas como las cenizas son prácticamente inexistentes.

A partir de la Revolución Industrial la población mundial ha crecido exponencialmente hasta alcanzar los 6.000 millones de habitantes actuales y, en consecuencia, las necesidades energéticas han aumentado en igual medida. La sociedad de consumo en la que vivimos se caracteriza por un desmedido consumo energético al que debemos darle respuesta de formas imaginativas para poder mantener, en la medida de lo posible, el respeto por el medio ambiente.

El concepto de “Intensidad Energética” nos permite relacionar el consumo de energía primaria o final por unidad de PIB. De esta forma podremos valorar la

eficiencia energética de los procesos productivos de un país: A mayor intensidad energética, menor será la citada eficiencia.

En la tabla siguiente podemos comparar los valores de Intensidad Energética para diferentes países de la Unión Europea:

Fecha Actualización: 22/02/2011

#### IV.1. INTENSIDAD ENERGÉTICA DE LA ECONOMÍA (1)

Kilogramos equivalentes de petróleo por 1000 euros

	Zona										España (2)	
	UE-27	UE-15	Euro	Alemania	Irlanda	España	Francia	Unido	EE.UU.	Japón	Nivel	Var. inter-anual (%)
1997	204,4	179,0	184,9	181,1	152,0	194,5	190,8	156,6	227,5	103,2	189,2	1,9
1998	200,4	177,3	183,5	177,0	149,8	196,7	190,0	154,7	219,9	103,6	193,2	2,1
1999	193,1	172,3	178,9	170,6	143,5	197,4	183,6	148,6	215,5	105,5	193,1	-0,1
2000	187,3	167,6	174,6	166,0	137,0	196,2	179,1	144,5	212,8	103,9	192,9	-0,1
2001	187,8	168,1	175,5	169,2	135,2	193,6	181,4	141,8	206,4	102,0	190,1	-1,5
2002	185,1	165,6	174,0	165,5	129,7	195,0	179,7	135,3	205,4	101,9	191,5	0,7
2003	187,2	167,3	176,8	167,2	122,0	195,6	180,8	134,2	200,8	99,6	191,4	0,0
2004	184,8	165,8	175,8	166,1	123,0	198,1	179,4	131,0	197,9	100,1	193,5	1,1
2005	181,3	162,8	173,0	163,4	110,6	195,4	176,5	128,4	193,1	97,8	191,9	-0,8
2006	175,7	157,3	167,5	159,2	107,7	187,1	170,7	122,9	186,3	95,6	182,8	-4,7
2007	169,1	151,5	162,1	152,0	103,9	183,9	165,0	115,2	185,5	92,5	179,6	-1,8
2008	167,1	150,0	160,5	151,1	106,5	176,4	166,7	113,7	180,6	90,1	171,6	-4,4
2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	162,4	-5,4
2010 (3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	164,7	1,4

(1) Consumo de energía primaria/PIB. El PIB en índices de volumen encadenados referidos al año 2000, y con los tipos de cambio del propio año 2000. Fuente: Eurostat

(2) Fuente: MITYC e INE

(3) Estimación anual con información del periodo enero-septiembre

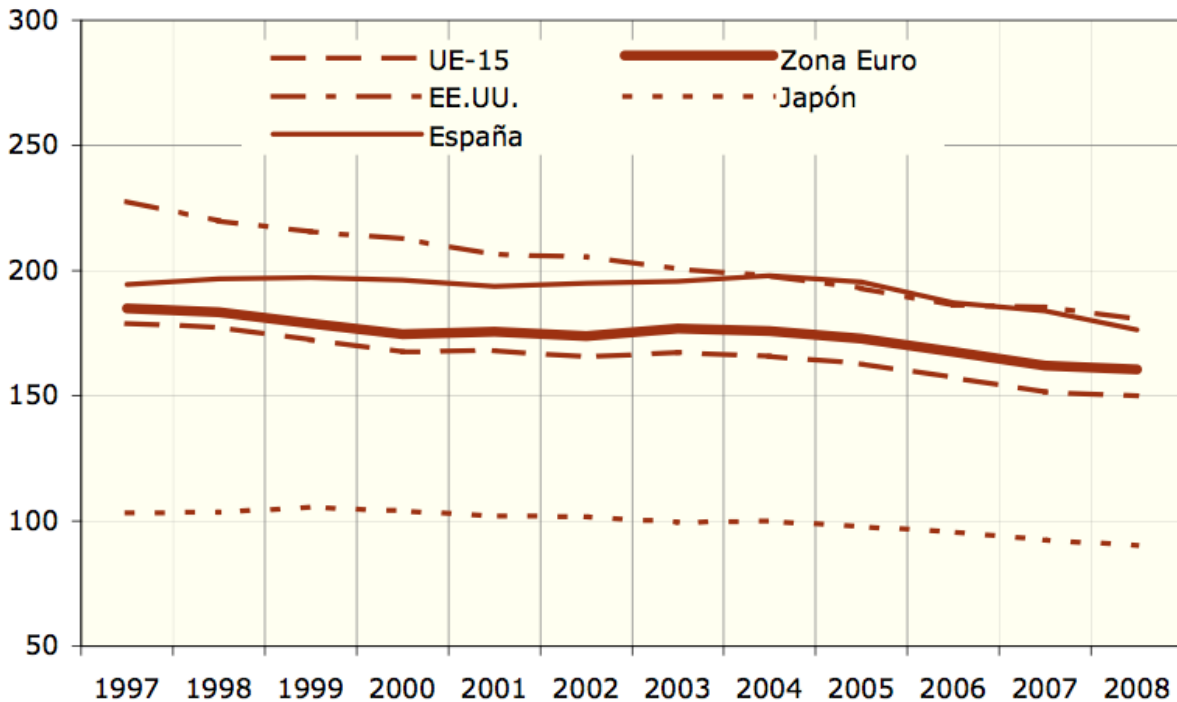
Fuente: Eurostat, MITYC e INE

Tabla comparativa de Intensidad Energética. (Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio)

Según la Agencia Europea de Medio Ambiente, la contaminación atmosférica es el factor ambiental con un mayor impacto en la salud en Europa. No obstante, los estudios acerca de la contribución y el impacto de las emisiones contaminantes derivadas del tráfico interior y estancia en puerto de los buques mercantes siendo como son, por potencia instalada y tipo de combustible, un factor adicional de contaminación de gran importancia en las ciudades portuarias, se encuentran todavía en fase muy inicial. En este sentido, es preciso recordar que la mayor parte de la población mundial se concentra en las zonas costeras y que por la tendencia actual de agrupación en ciudades, más de un 70% de la población del planeta vive en ciudades portuarias o en su entorno.

Para comprobar la posición de desventaja en cuanto a eficiencia energética de los procesos productivos de España respecto al resto de países de la Unión Europea y especialmente respecto de Japón, presentamos el gráfico siguiente:

## Datos comparados



Datos comparados correspondientes a la Intensidad Energética de diferentes estados.

(Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio)

De la misma forma que la Unión Europea ha propuesto la utilización de combustibles alternativos a los derivados del petróleo para su uso en el transporte urbano a través de las Comunicaciones de la Comisión COM (2001) 547 y COM (2006) 845, apostando por los biocombustibles, el gas natural y el hidrógeno, será necesario abordar, seriamente, la posibilidad de regular las emisiones contaminantes asociadas a las actividades portuarias por su implicación directa con la contaminación atmosférica de las ciudades.

La Organización Marítima Internacional ya está planificando aplicar medidas orientadas al mercado de emisiones dada la aportación del transporte marítimo a la contaminación global.

Los proyectos de Autopistas del Mar y Short Sea Shipping también están iniciando la adopción de ecobonos para líneas que retiren volúmenes de carga de las autopistas terrestres, pero estas medidas no cuantifican la contaminación reducida midiendo el consumo de combustibles sino en base a estimaciones.

No obstante, hay un proyecto en marcha a nivel local que potencialmente implicaría los puertos de Barcelona y Gijón que apunta a la posibilidad de cuantificación en tiempo real de la contaminación con origen en los buques atracados, en maniobras o navegando en el interior de los puertos o en sus inmediaciones como pueden ser las zonas de fondeo o dispositivos de separación del tráfico, entre otros.

## **2.2 Emisiones contaminantes con origen en el transporte marítimo**

Las estimaciones del consumo de combustible y de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del transporte marítimo varían en la escala temporal, los supuestos en que se basan y las técnicas de modelización. Como se indica en la figura siguiente, se estima que las emisiones del transporte marítimo internacional representan del 1,6 al 4,1% de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> resultantes de la quema de combustible. Según las previsiones de la OMI, las emisiones del transporte marítimo internacional aumentarán en un factor de 2,4 a 3 entre 2007 y 2050. Dentro del sector del transporte, el transporte marítimo representó el 10% de las emisiones en 2005<sup>2</sup>.

El transporte por carretera constituyó el 73%, seguido del transporte aéreo (el 12%), el transporte en ductos (el 3%) y el transporte por ferrocarril (el 2%). Se prevé que, si no se frenan, las emisiones procedentes del sector del transporte se habrán duplicado en 2050.

En la tabla siguiente mostramos las estimaciones sobre consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas del transporte marítimo así como su proyección según diferentes grupos de investigación, aparecidas en la publicación “El Transporte Marítimo y el Reto del Cambio Climático”, de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo a fecha de 9 de diciembre de 2008:

---

<sup>2</sup> Proporción del transporte expresada como porcentaje del total de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> resultantes de la quema de combustible en 2005, según la Agencia Internacional de Energía (AIE).

	Año de base	CO <sub>2</sub>	Combustible	Porcentaje de la quema de combustible mundial <sup>a</sup>	Crecimiento proyectado
		Millones de toneladas			
Estudio actualizado de la OMI (2008)	2007	843	277	3,1	En un factor de 1,1 a 1,3 para 2020, y de 2,4 a 3 para 2050
Grupo de Expertos de la OMI (2007)	2007	1.120	369	4,1	+ 30% para 2020
Estudio de GEI de la OMI (2000)	1996	419,3	138	1,6	-
Agencia Internacional de Energía (2005)	2005	543	214	2,0	-
TRT Trasporti e Territorio	2006	1.003	N.A.	3,7	-
Endressen et al., 2007 <sup>b</sup>	2002	634	200	2,3	+ 100 a 200% para 2050
Eide et al., 2007 <sup>b</sup>	2004	704	220	2,6	+ 100 a 200% para 2050
Eide et al., 2007 <sup>b</sup>	2006	800	350	2,9	+ 100 a 200% para 2050
Corbett et al., 2003 <sup>b</sup>	2001	912	289	3,1	-

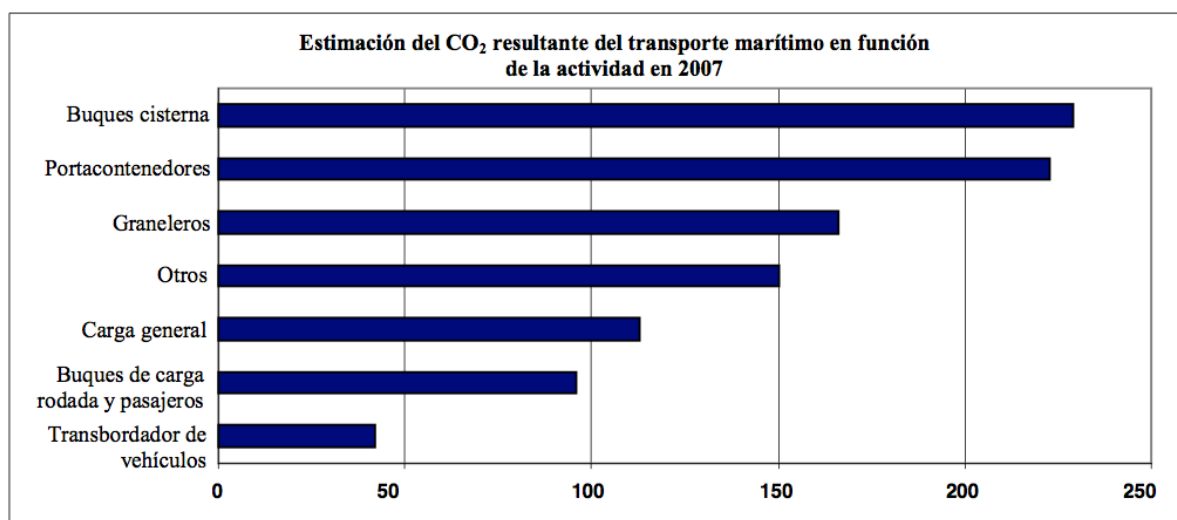
<sup>a</sup> Emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> resultantes de la quema de combustible, datos de la Agencia Internacional de Energía de 2005.

<sup>b</sup> A partir de fuentes secundarias, entre ellas el estudio actualizado de la OMI sobre los GEI, 2008.

Estimaciones del consumo de combustible, las emisiones de CO<sub>2</sub> y el crecimiento proyectado.

(Fuente: El Transporte Marítimo y el reto del Cambio Climático. Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo. 2009)

En el gráfico siguiente se ilustra la huella de carbono del transporte marítimo internacional, desglosado por tipo de buque. La gran dependencia del petróleo, en particular del petróleo pesado, para la combustión pone de relieve la utilidad de una mayor eficiencia energética y de una diversificación de las fuentes de energía para la adopción de medidas de mitigación en el transporte marítimo.



Emisiones de CO<sub>2</sub> del sector del transporte marítimo en millones de toneladas.

(Fuente: UNCTAD, basada en el estudio actualizado de 2000 de la OMI sobre las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del tráfico marítimo, 2008 (OMI, 2008). Incluye el transporte marítimo internacional y nacional y excluye a los buques de pesca y militares)

Otros contaminantes procedentes de la navegación marítima aumentan a un ritmo aún más acelerado que el dióxido de carbono, como es el caso de las emisiones de hollín y de gases sulfurosos, que crecerán por encima del 30% en la próxima década. Ambos contaminantes contribuyen a la lluvia ácida y a todo tipo de enfermedades respiratorias, incluido el cáncer de pulmón. De hecho, la Organización Mundial de la Salud (OMS), mediante su “Guía de Calidad del Aire” (actualización 2005) ha establecido en 60.000 las personas fallecidas cada año como consecuencia de la polución originada por la flota mercante mundial.

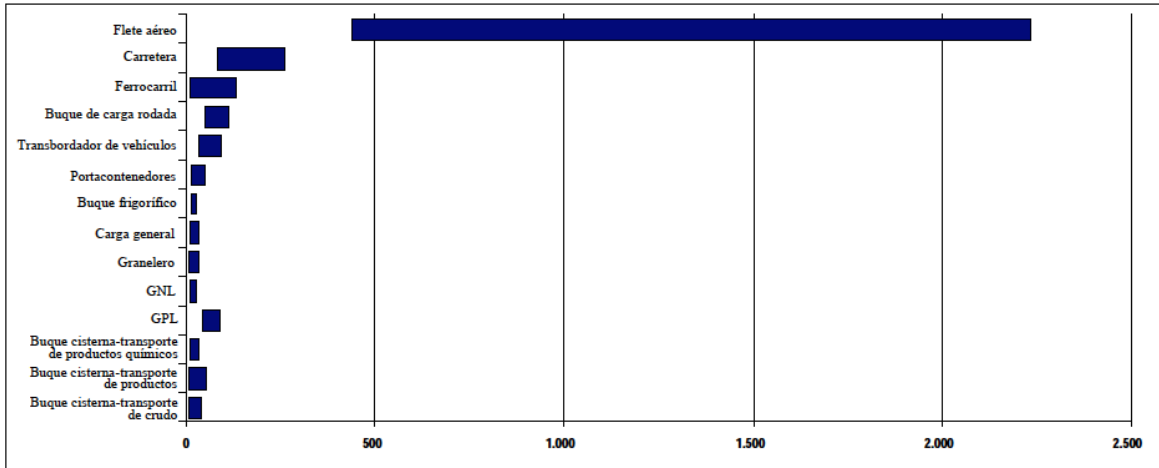
Algunas medidas destinadas a paliar este hecho se encuentran en el proyecto de informe del Parlamento Europeo, Comisión de Transporte y Turismo, doc. 2009/2095(INI) de 4 de Enero 2010: “Sobre los objetivos estratégicos y recomendaciones para la política de transporte marítimo de la UE hasta 2018”.

Es en este marco de actuación en el que se propone la utilización de Gas Natural como combustible, ya que, por su composición, reduciría prácticamente todas las emisiones actualmente reguladas por convenios internacionales y leyes nacionales y reduciría notablemente las de CO<sub>2</sub> de forma similar a lo que ha ocurrido en el Sector Industrial y en el Terciario y residencial.

No obstante, es importante no perder la referencia de cuál es la aportación del transporte marítimo al problema de la contaminación ambiental, ya que, aunque en términos absolutos las emisiones de GEI del transporte marítimo internacional son importantes, en términos relativos el transporte marítimo, en particular cuando se utilizan buques grandes, supera otros modos de transporte en lo que se refiere a eficiencia del combustible e inocuidad para el clima. Calculadas en función de tonelada transportada por kilómetro y según el tamaño del buque, las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte marítimo son inferiores a las de otros modos de transporte. Por ejemplo, las emisiones resultantes del transporte por ferrocarril podrían ser de 3 a 4 veces superiores a las de los buques cisterna, y las del transporte por carretera y aéreo entre 5 y 150 veces y 54 y 150 veces superiores, respectivamente. De la misma manera, en lo que se refiere al consumo de combustible (kilovatios (kW)/tonelada/km), se estima que, por ejemplo un portacontenedores (3.700 unidades equivalentes a 20 pies (TEU)), consume como promedio 77 veces menos energía que un avión de carga (Boeing 747-400), alrededor de 7 veces menos que un camión de carga pesada y unas 3 veces menos que el ferrocarril.



Con todo esto queremos expresar que si conseguimos que el transporte marítimo sea menos contaminante, siendo ya el más eficiente energéticamente, daremos un paso muy importante hacia la defensa de nuestro planeta. Los valores relativos pueden observarse en el gráfico siguiente:



Eficiencia de CO2 por buque de carga (gr CO2 / ton-Km).

(Fuente: UNCTAD según datos de la OMI (2008))

De los datos anteriores, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y desarrollo, concluye que el mayor uso del transporte marítimo, también en el marco del transporte multimodal y mediante el cambio modal, puede generar ciertos beneficios en lo que se refiere a la eficiencia de CO<sub>2</sub> y de energía. Sin embargo, no es probable que el transporte marítimo internacional ofrezca siempre una alternativa viable a otros modos más contaminantes, puesto que en general no se sobrepone a otros modos de transporte.

Puesto que se utilizan diferentes modos para transportar diferentes tipos de mercancías a distancias variables, un cambio modal podría ser una opción, pero sólo para segmentos de mercado específicos (por ejemplo, el transporte marítimo de corta distancia en Europa). También se sostiene que probablemente sea más eficaz mejorar las prácticas ambientales de cada modo de transporte que recurrir a un cambio modal. Sin embargo, si el cambio al transporte marítimo es técnicamente factible y económicamente viable, sería importante crear un clima de políticas gubernamentales que propicie un cambio modal específico y bien concebido.

### **2.3 Regulaciones de la OMI sobre emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)**

La OMI no ha adoptado hasta la fecha ningún instrumento de cumplimiento obligatorio para la reducción de las emisiones GEI procedentes de los buques, si bien es cierto, que ha intensificado el estudio de la contribución real del transporte marítimo al problema.

El objetivo de la OMI es fijar un marco de referencia vinculante, coherente y exhaustivo sobre las emisiones de GEI y para ello se encargó al Comité de Protección del Medio marino (CPMM) el desarrollo de un marco eficaz y vinculante para todos los estados miembros, rentable, práctico, transparente, exento de fraude y de fácil administración.

Entre las distintas medidas previstas destacan las siguientes: establecer un sistema de gravámenes aplicables a todos los buques que realizan viajes internacionales, aplicación de energía eólica, la reducción de velocidad y el suministro de energía desde tierra. En el largo plazo, figuran medidas de carácter técnico para el proyecto de nuevos buques, el uso de un índice de eficiencia tanto para buques nuevos como existentes, la utilización de combustibles alternativos, el pago de tasas portuarias especiales por emisión de CO<sub>2</sub> y un régimen de comercio de derechos de emisión.

La Organización Marítima Internacional estudia además fuentes de combustible alternativas a los derivados del petróleo. En este sentido es muy interesante profundizar en el análisis que hace de la utilización de gas natural.

Por una parte afirma que se debería utilizar gas natural licuado (GNL) como combustible limpio alternativo, que no contiene azufre y casi no emite partículas sólidas. Además, señala que las emisiones de NO<sub>x</sub> se reducen hasta un 90% y afirma que la reducción de CO<sub>2</sub> es del 25% respecto a los combustibles convencionales.

Sin embargo, considera dificultosa su aplicación por los problemas técnicos y de seguridad que plantea y por la falta de infraestructura de GNL en los puertos de suministro de combustible por lo que recomienda su uso para buques que operen en rutas fijas y travesías de corta duración.

Es preciso comentar que, en contra de lo afirmado por la OMI, existen otras modalidades de carga de gas natural, por ejemplo, como gas comprimido que resuelve una parte importante de los problemas logísticos en puerto. Por otra, las infraestructuras de almacenamiento de GNL crecen de forma rápida a lo largo de todo el mundo. Un ejemplo concreto es España, donde se ha pasado de 2 plantas de GNL a 7 en un periodo de 15 años, dando cobertura a todo el litoral ibérico.

## **2.4 Posición de la unión europea**

La lucha contra el Cambio Climático es una de las prioridades de la Unión Europea y por ello ha liderado todas las iniciativas internacionales surgidas en este sentido. Resultado de dicho compromiso es su Política Climática que integra, además del control de los gases de efecto invernadero, conseguir los siguientes objetivos:

- Consumir de forma más racional una energía menos contaminante;
- Disponer de medios de transporte más limpios y equilibrados;
- Responsabilizar a las empresas sin poner en peligro su competitividad;
- Obrar por que la ordenación territorial y la agricultura estén al servicio del medio ambiente;
- Crear un entorno favorable para la investigación y la innovación.

Las investigaciones efectuadas recientemente, en particular, el estudio P.E.S.E.T.A. publicado en 2007 o el informe Stern, publicado en 2006 en el Reino Unido indican unos costes de gran magnitud desde el punto de vista económico y social en caso de insuficiente acción para luchar contra el cambio climático. El informe Stern estima este coste entre el 5 y 20 % del PIB mundial.

El aumento de la mortalidad y la morbilidad (enfermedades) vinculadas a las variaciones de temperatura, los daños causados por las crecidas más frecuentes y la subida del nivel del mar, la expansión de la desertización en los países del sur y la disminución de reservas de agua dulce demuestran la variedad de consecuencias nefastas vinculadas al cambio climático que afectan a las poblaciones, los ecosistemas y los recursos, así como a las infraestructuras y la calidad de vida.

La Unión Europea ha propuesto que se fije por objetivo, en el marco de las negociaciones internacionales, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de los países desarrollados en un 30 % (respecto de su nivel de 1990) de aquí a 2020.

En el Consejo Europeo de marzo de 2007, los Estados Miembros se comprometieron también firmemente a actuar en favor de estos objetivos a través de las siguientes medidas energéticas:

- Mejorar la eficiencia energética de la UE en un 20% de aquí a 2020;
- Aumentar el porcentaje correspondiente a las energías renovables en un 20% de aquí a 2020;
- Desarrollar una política de captura y almacenamiento geológico del carbono que preserve el medio ambiente.

El programa europeo sobre el Cambio Climático incluye, entre otras, medidas específicas sobre el sector del transporte. Estas medidas, recogidas en el Libro blanco sobre la Política Común de Transportes contribuyen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Entre otras, podemos citar las siguientes:

- Una propuesta para modificar el equilibrio entre los distintos medios de transporte mediante el fomento del ferrocarril y del transporte marítimo.
- Una propuesta de mejora de la utilización de la tarificación de las infraestructuras gracias al establecimiento de una tarificación justa y equilibrada entre los distintos medios de transporte.
- Una directiva dirigida a fomentar el uso de biocombustibles en el transporte.

## 2.5 Posibles enfoques de la mitigación de la contaminación con origen en el transporte marítimo

### 2.5.1 Introducción

Una consideración importante en relación con las opciones de mitigación para el transporte marítimo internacional es la complejidad inherente a este sector, ya que las emisiones de CO<sub>2</sub> se generan en gran parte fuera de las fronteras nacionales y los buques pueden estar vinculados a diferentes naciones por medio del pabellón, la propiedad efectiva y la explotación.

En el cuadro siguiente se destacan algunas posibles medidas de mitigación que se aplicarían al transporte marítimo:

Ámbito de intervención	Medidas	Ejemplos
Tecnología y energía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas de propulsión eficientes y con menores emisiones</li> <li>• Combustibles limpios y fuentes de energía alternativas</li> <li>• Proyectos de los buques (estructura, casco y maquinaria)</li> <li>• Tecnologías de control de las emisiones (por ejemplo, tratamiento de los gases de escape, captura y almacenamiento del carbono)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zonas de control de las emisiones de azufre de la UE y la OMI</li> <li>• Solar Sailor 2006 y Skysails 2006</li> <li>• Sustitución del diésel por gas natural</li> </ul>
Operacional	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de la velocidad</li> <li>• Selección de rutas</li> <li>• Vigilancia de las condiciones meteorológicas y de navegación</li> <li>• Colaboración entre puertos, transportistas, otros modos de transporte y otros agentes de la cadena de suministro</li> <li>• Suministro de energía desde tierra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anuncio de la NYK a comienzos de 2008 de que reducirá la velocidad de todos los buques de la flota en un 10% para rebajar el consumo de combustible en hasta un 25%</li> <li>• Acuerdo de compartición de buques entre Maersk MSC y CMA-CGM en el comercio transpacífico</li> </ul>

Mercado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tasas/derechos ambientalmente diferenciados</li> <li>• Límites máximos y comercio de derechos de emisión</li> <li>• Impuestos</li> <li>• Subsidios</li> <li>• Planes voluntarios del sector</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Derechos de paso en vías navegables de Suecia, sistema del Premio Verde, prima por el transporte marítimo ecológico, derechos de arqueo diferenciados en Noruega</li> <li>• MDL y aplicación conjunta del Protocolo de Kyoto</li> <li>• Régimen de comercio de derechos de emisión de la UE y mecanismo propuesto de reducción de las emisiones del transporte marítimo internacional</li> <li>• Posible impuesto mundial sobre el combustible</li> <li>• Programa de inversión en la calidad del aire de California</li> <li>• Contratación preferencial</li> </ul>
---------	---	---

Posibles opciones de mitigación. (Fuente: UNCTAD. Análisis Bibliográfico)

Cada una de las opciones entraña oportunidades y desafíos, y un desafío clave es el relativo a los costos posiblemente elevados y al hecho de que muchas soluciones que podrían beneficiar a todos (por ejemplo, los combustibles alternativos más limpios) se hallan en las fases iniciales de su desarrollo. A este respecto, se necesitan tiempo e importantes inversiones para garantizar la viabilidad comercial y la amplia difusión. En particular, desde la perspectiva de los países en desarrollo, pueden surgir inquietudes acerca de las repercusiones económicas de las diversas medidas de mitigación y, en algunos casos, de la capacidad de adoptar y aplicar una serie de medidas basadas en la tecnología. Es probable que los costos mayores ejerzan una presión adicional sobre el sector marítimo y, por extensión, sobre los costos del transporte, que ya son desproporcionadamente más altos en los países en desarrollo y tienen consecuencias para la competitividad comercial. Como se recordará, el sector ya está afrontando mayores gastos debidos a los requisitos de seguridad de la cadena de suministro, las medidas de facilitación del comercio, otros reglamentos ambientales (por ejemplo, el relativo a los contaminantes atmosféricos), y la gran inestabilidad de los precios del combustible.

### **2.5.2 Mejoras en la tecnología y en el uso de la energía**

Las mejoras en la tecnología y en el uso de la energía pueden reducir las emisiones al sustituirse los equipos y motores más viejos, menos eficientes desde el punto de vista energético o más contaminantes. Las posibilidades que ofrecen las medidas técnicas (por ejemplo, las tecnologías que tienen que ver con el casco, las hélices y la maquinaria) de reducir el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub> se estiman en una proporción del 5 al 30% en los nuevos buques y del 4 al 20% en los antiguos.

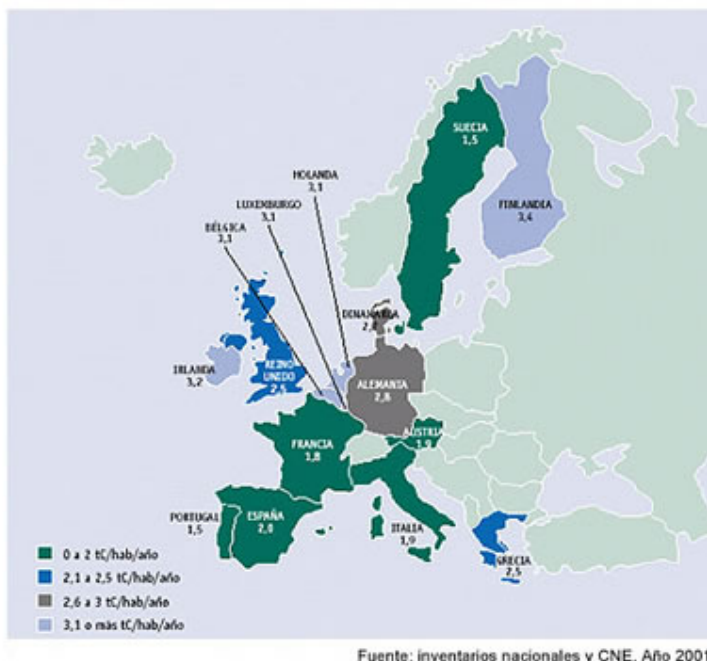
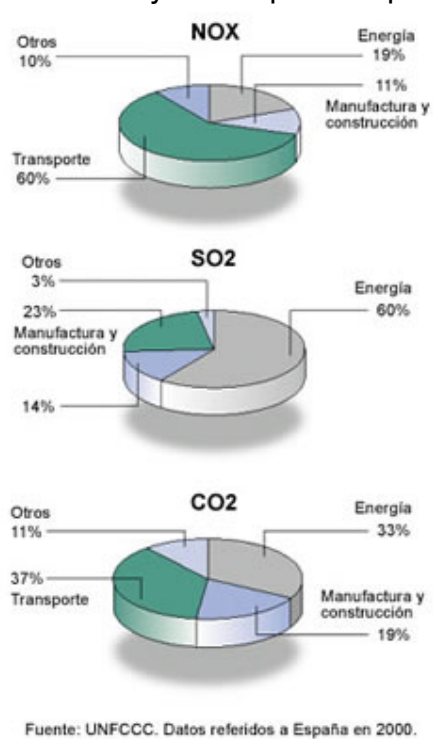
Un cambio marcado a la utilización de combustibles y fuentes de energía alternativos podría resultar difícil a corto plazo, ya que la mayoría de las técnicas alternativas prometedoras todavía no pueden competir del todo con los motores diésel. En algunos casos es posible pasar del diésel al gas natural (por ejemplo, en los transbordadores de navegación interior en Noruega y en los buques de suministro mar adentro que operan en la plataforma continental noruega, así como los ya citados buques gaseros cuyos motores de combustión interna usan también esta sustancia). En cuanto a los biocombustibles, las inquietudes que suscitan los procesos de producción y las repercusiones conexas para la seguridad alimentaria, el cambio climático y la sostenibilidad hacen que su futuro sea incierto. Su utilización dependerá de los progresos que se hagan en el campo de los biocombustibles menos controvertidos que aún no están ampliamente disponibles (por ejemplo, los obtenidos a partir de desechos). Los paneles y velas solares, así como los buques propulsados por hidrógeno y la energía procedente de pilas de combustible para motores auxiliares, constituyen opciones a largo plazo. La tecnología de captura y almacenamiento del carbono podría también seguir desarrollándose y aplicarse al sector del transporte.

Los puertos, como nodos fundamentales de la cadena de transporte y por su capacidad de captar a otros asociados, puede reducir sus propias emisiones así como las que se producen a lo largo de las cadenas de suministro. Esto puede lograrse, por ejemplo, mediante la colaboración con otros responsables del transporte y la logística y la coinversión en equipo de tierra y en vehículos, como transbordadores, gabarras y soluciones ferroviarias. Recientemente, el compromiso de los puertos de reducir la huella de carbono culminó en la adopción de la Declaración Mundial de los Puertos sobre el Clima, en julio de 2008.

Junto con la cadena de suministro, la optimización del uso de vehículos podría ayudar a mitigar las emisiones mediante:

- a) la telemática;
- b) el transporte inteligente;
- c) los diseños nuevos de vehículos y motores;
- d) la programación, planificación y establecimiento de itinerarios con ayuda de la tecnología de la información y las comunicaciones.

De igual manera, las soluciones de facilitación del comercio, como los datos aduaneros computadorizados (por ejemplo, el Sistema Automatizado de Datos Aduaneros (SIDUNEA)), podrían desempeñar un papel. Las experiencias con la automatización aduanera y los proyectos de ventanilla única han demostrado que el volumen de energía consumido durante los tiempos de espera en los puertos fronterizos y en los puertos puede reducirse considerablemente.



Emisiones Contaminantes por Sectores. (Fuente: Comisión Nacional de Energía)



### **2.5.3 Medidas operacionales**

Las medidas operacionales también son importantes para la mitigación porque se estima que ofrecen la posibilidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a corto plazo en hasta el 40% mediante, por ejemplo, los cambios de rutas y la reducción de la velocidad. La reducción de la velocidad de los buques para ahorrar combustible y, por extensión, reducir las emisiones de GEI es una estrategia fundamental para rebajar los costos del transporte marítimo. Una disminución de la velocidad en un 10% puede traducirse en una reducción del 25% del consumo de combustible. Varias compañías navieras aplicaron este criterio para rebajar sus costos de funcionamiento durante el período de alza sin precedentes de los precios del petróleo y del combustible para buques en 2008. Los operadores redujeron la velocidad de navegación, se programaron las rutas y concertaron asociaciones y alianzas para aprovechar las economías de escala consolidando los circuitos existentes y utilizando buques mayores y de menor consumo de combustible. Como efecto secundario, estas estrategias de reducción de costos han ayudado en cierta medida a contener el aumento de los fletes que, de lo contrario, podría haber repercutido negativamente en el comercio, incluido el de los países en desarrollo.

En los puertos, las operaciones se pueden mejorar, por ejemplo, reconfigurando los terminales para facilitar el acceso de las gabarras, aumentar la capacidad de transporte ferroviario en los muelles, acelerar la carga y la descarga, reducir la congestión y suministrar electricidad o gas natural (para que sea usado como combustible en los motores auxiliares) desde tierra.

### **2.5.4 Programas basados en el mercado**

Los programas basados en el mercado pueden comprender medidas como el cobro de impuestos, derechos portuarios diferenciados y programas de comercio de los derechos de emisión (límites máximos y comercio, y créditos de emisión). Un análisis indica que un instrumento de mercado creativo que abarque todos los buques podría generar beneficios considerables y diferenciados y recaudar entre 10.000 y 45.000 millones de dólares anualmente. Si esos ingresos se canalizaran hacia una combinación de proyectos de adaptación, transferencia de tecnología y mitigación de las emisiones, los beneficios de esas políticas para los países en desarrollo podrían superar en dos a cinco veces los costos. Dicho esto, son

muchas las cuestiones que quedan por abordar antes de poder sacar conclusiones definitivas sobre todas las consecuencias de esos tipos de medidas. Muchos países en desarrollo han pedido que se efectúen más análisis y evaluaciones detalladas de las diversas propuestas que tiene en examen la OMI. Las preocupaciones se relacionan, en particular, con la competitividad del comercio, pero también con las necesidades de asistencia técnica y de fomento de la capacidad.

Las iniciativas voluntarias del sector comprenden, por ejemplo, el compromiso de cumplir con una tasa media de emisión, conocida como "punto de referencia", así como la promoción de tecnologías específicas para reducir las emisiones y la contratación preferencial de los transportistas menos contaminantes, por la cual los expedidores (tales como IKEA) exigen a los armadores y a los puertos que compitan no sólo en cuanto a los costos sino también en cuanto a las prácticas ambientales.

### **2.5.5 Cuestiones energéticas**

Las políticas que responden al cambio climático y las que se relacionan con la seguridad de la energía pueden tener objetivos diferentes, pero están interconectadas y tienen importantes sinergias. Mitigar la dependencia mundial de las fuentes de combustibles fósiles y reducir las emisiones de GEI producidas por la quema de esos combustibles son dos caras de la misma moneda. Según las proyecciones, las necesidades de energía primarias del mundo crecerán en un 55% entre 2005 y 2020 (World Energy Outlook 2007, de la Agencia Internacional de Energía). La AIE ha estimado en 22 billones de dólares la inversión acumulativa requerida en infraestructura energética en el período comprendido entre 2005 y 2030.

Sin embargo, no está claro si se logrará satisfacer la demanda de energía futura, ni de qué forma, dadas las preocupaciones por los niveles de suministro de combustibles fósiles y las opiniones cada vez más concordantes en el sentido de que los niveles de producción mundial alcanzarán una cota máxima y después comenzarán a disminuir (el pico del petróleo). Ante la falta o la inasequibilidad del petróleo y el gas, el carbón y las fuentes de combustibles fósiles no convencionales y más contaminantes se volverán más atractivos y competitivos. Aunque los biocombustibles encierran un gran potencial, es necesario evaluar sus repercusiones en la sostenibilidad para asegurarse de que ello no

menoscabe su atractivo y de que se logre un equilibrio entre los objetivos de la seguridad energética, la política climática y de los Objetivos de Desarrollo del Milenio.

Puesto que en el transporte marítimo el principal combustible es el petróleo, la seguridad energética y la inestabilidad de los precios del petróleo son particularmente importantes en este sector. En general, los costos del combustible representan entre el 20 y 25% de los costos totales de explotación de los buques, aunque esta proporción aumentó a más del 50% cuando los precios del petróleo alcanzaron sus niveles máximos a mediados de 2008. Los precios de la energía, a través de sus efectos en los costos de explotación de los armadores y, por lo tanto, en los fletes, pueden ofrecer incentivos para una descarbonización efectiva mediante una inversión importante -entre otros, del sector privado- en tecnologías que ahorren energía y aumenten la eficiencia energética. Ello podría generar otros beneficios, como la reducción de los costos del transporte y la promoción del comercio, especialmente en el caso del comercio de los países en desarrollo que depende del transporte marítimo.

## **2.6 Iniciativa del Port de Barcelona**

Con el objetivo de cumplir lo que marca el Decreto 152/2007 de 10 de julio, aprobado por el Gobierno de la Generalitat de Catalunya y de acuerdo al Plan de Mejora de la Calidad del Aire según el Decreto 226/2006 de 23 de mayo, el Port de Barcelona puso en marcha un grupo de trabajo de Calidad Ambiental dentro del Consejo Rector para la Promoción de la Comunidad Portuaria cuyo objetivo es la defensa de los aspectos medioambientales relacionados con el puerto, especialmente en lo referente a las emisiones de dos contaminantes: el óxido de nitrógeno (NOx) y las partículas en suspensión de diámetro inferior a las 10 micras (PM10).

Fruto de esta voluntad de trabajo en favor del medio ambiente, se ha firmado a fecha de 16 de Marzo de 2011 un acuerdo de colaboración entre el Port de Barcelona y las compañías eléctricas ENDESA, SA y ENEL SPA -la primera filial de la segunda- para el desarrollo del proyecto Puerto Verde en el Port de Barcelona, que permitirá suministrar electricidad a los barcos desde tierra cuando estén atracados en puerto y reducir así la emisión de gases a la atmósfera. El

Consejo de Administración de la Autoridad Portuaria de Barcelona (APB) aprobó el viernes la firma de este acuerdo de colaboración.

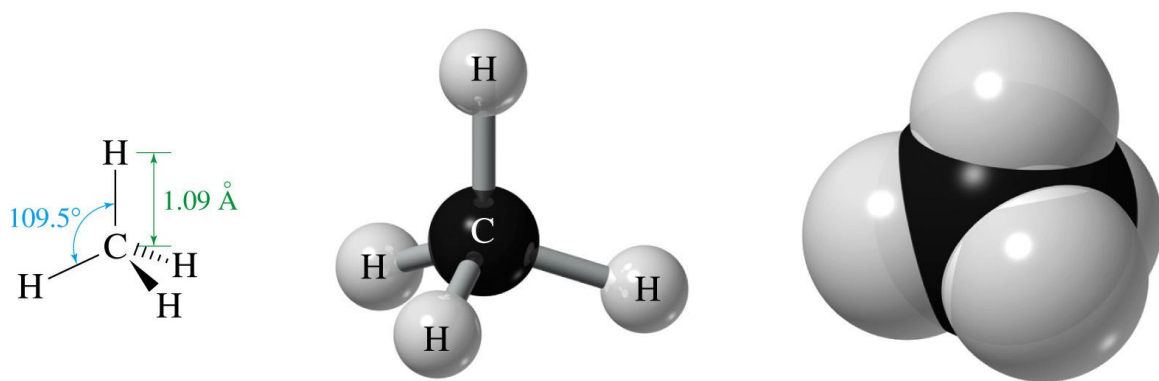
El proyecto Puerto Verde ha sido puesto en marcha por ENEL en los puertos italianos de Venecia, La Spezia y Civitavecchia, y en este último ha diseñado un modelo de suministro eléctrico a los buques atracados en puerto, llamado Ofshore Power Supply (OPS), el primero de estas características que se desarrolla en el Mediterráneo. El Port de Barcelona, especialmente sensibilizado en los aspectos medioambientales que afectan a la explotación portuaria y que apuesta por un modelo portuario sostenible y respetuoso con su entorno social y urbano, ha mostrado su interés en la OPS como solución para reducir las emisiones de gases que generan los barcos cuando se encuentran en puerto, especialmente los óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas en suspensión de diámetro inferior a 10 micras (PM10).

El acuerdo de colaboración que firmará el Port con ENEL y ENDESA define como objetivo que el Port de Barcelona sea identificado como un Puerto Verde. Para ello se realizará un estudio de la situación actual y se redactará un plan que establezca la infraestructura necesaria y defina los procesos operativos y comerciales para el suministro de electricidad a los buques atracados en puerto con el sistema OPS. Para alcanzar este objetivo, se establecerá un grupo de trabajo que, en base al know how desarrollado por ENEL en los puertos italianos, especificará el desarrollo, operativa y mantenimiento del sistema OPS en el Port de Barcelona. El grupo de trabajo establecerá también los requisitos que deberá tener el futuro operador del sistema OPS en el puerto.

El acuerdo también establece que se creará otro grupo de trabajo formado por representantes del Port, ENEL y ENDESA para implantar un plan de Iluminación Eficiente (IE) en el Port de Barcelona. ENEL y ENDESA, compañías que han desarrollado proyectos tecnológicos de eficiencia energética aplicados a la iluminación, aportarán sus conocimientos en materia de iluminación pública y artística. ENEL dispone de un sistema de iluminación basado en la tecnología LED que permite ahorrar cantidades significativas de energía.

## CAPÍTULO 3

### Propiedades del gas natural licuado (LNG)



Diferentes vistas del Modelo Molecular del Metano (Fuente: Portal de Química Orgánica  
<http://kuadritoscom.blogspot.com/2010/05/atomo-de-carbono.html>)



### 3.1 Propiedades físicas y composición del LNG

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos el cual, cuando es licuado, forma un líquido incoloro e inodoro. El gas natural licuado (LNG), normalmente se transporta y se almacena a una temperatura muy cercana a la de evaporación a presión atmosférica, aproximadamente a  $-160^{\circ}\text{C}$ .

La composición real del gas natural licuado (LNG) de cada terminal de carga como pueden ser Qatar, Omán, Point Fortin o Pampa Melchorita, varía dependiendo de su fuente y del proceso de licuefacción, pero el principal componente siempre es METANO ( $\text{CH}_4$ ). Pueden aparecer otros componentes en pequeños porcentajes de hidrocarburos más pesados, por ejemplo: Etano, Propano, Butano, Pentano, y posiblemente una pequeña cantidad de Nitrógeno.

Para realizar la mayor parte de los cálculos de ingeniería, como pueden ser los de las presiones que han de soportar los sistemas de tuberías, se supone que las propiedades físicas del Metano puro representan aquellas del gas natural licuado. Sin embargo para realizar los cálculos de la carga transportada, en los que el cálculo exacto de la densidad y poder calorífico son necesarios, se utilizan análisis reales que darán origen a propiedades físicas particulares para cada cargamento o partida cargada a bordo.

TERMINAL DE CARGA		Ras Laffan	Das Islands	Estándar
Metano	$\text{CH}_4$	90.28%	84.5%	89.63%
Etano	$\text{C}_2\text{H}_6$	6.33%	12.9%	6.32%
Propano	$\text{n-C}_3\text{H}_{10}$	2.49%	1.5%	2.16%
Butano	$\text{n-C}_4\text{H}_{10}$	0.49%	0.5%	1.20%
Iso-Butano	$\text{i-C}_4\text{H}_{10}$	00.0%	0.00%	0.00%
Pentano	$\text{n-C}_5\text{H}_{12}$	0.02%	0.00%	0.00%
Iso-Pentano	$\text{i-C}_5\text{H}_{12}$	00.0%	0.00%	0.00%
Nitrógeno	$\text{N}_2$	0.41%	0.6%	0.69%
Peso molecular promedio		17.88	18.56	18.12
Temperatura de ebullición a presión atmosférica		$-160.8^{\circ}\text{C}$	$-161^{\circ}\text{C}$	$-160^{\circ}\text{C}$
Densidad $\text{Kg/m}^3$		461.8	456.8	459.4
Energía Especifica $\text{kJ/Kg}$ .		54.414	54.031	54.090

Comparativa en la composición del LNG según terminales (La composición del LNG de la Terminal de Point Fortin, Trinidad y Tobago tiene unas propiedades muy similares a las del Metano puro).

Durante una travesía normal, el calor ambiental se transfiere a la carga de gas natural licuado a través del aislamiento del tanque, originándose de esta forma la evaporación o vaporización de parte de la carga, este fenómeno se conoce con el nombre de vaporización natural de la carga, y al vapor o gas Metano generado se le conoce como “BOIL-OFF”.

	Metano	Etano	Propano	Butano	Pentano	Nitrógeno
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	N <sub>2</sub>
<b>Peso molecular</b>	16.042	30.068	44.094	58.120	72.150	28.016
<b>Tª ebullición a 1 bar absoluto</b>	-161.5	-88.6	-42.5	-5	-36.1	-196
<b>Densidad del líquido a tª ebul.</b>	426.0	544.1	580.7	601.8	610.2	808.6
<b>Densidad vapor a 15°C, 1 bar.</b>	0.554	1.046	1.540	2.07	2.49	0.97
<b>Proporción: volumen de gas/ volumen de líquido</b>		619	413	311	311	205
<b>Límites de inflamabilidad.</b>	5.3-14%	3-12.5%	2.1-9.5%	2-9.5%	3-12.4%	No inflamable
<b>Temperatura de auto-ignición (°C)</b>	595	510	510/583	510/583	260	593
<b>Calor de vaporiz.</b>	510.4	489.9	426.2	385.2	357.5	199.3

Propiedades físicas del LNG.

La composición del LNG cambia debido a este proceso, ya que los componentes más ligeros, que tienen temperaturas de ebullición a presión atmosférica menores, se evaporan antes. Debido a esto el LNG que se descarga tiene un contenido porcentual menor de Nitrógeno y de Metano que el LNG cargado, y un porcentaje ligeramente mayor de Etano, Propano y Butano, debido a que se alcanza antes el punto o temperatura de ebullición a presión atmosférica del Metano y del Nitrógeno que el de los gases más pesados.

El rango de inflamabilidad del Metano en aire (21% de Oxígeno) va aproximadamente desde el 5.3% al 14% en volumen, representando estos dos valores el Límite Inferior de Explosividad y el Límite Superior de Explosividad. Por encima del 14% la mezcla arde pero no explota y por debajo del 5% la mezcla ni



arde ni explota. Para reducir este rango, el aire se mezcla o diluye con Nitrógeno hasta que el contenido de  $O_2$  se reduce a un valor del 2% en volumen, antes de realizar una operación de carga después de una estancia del buque en dique. En teoría no se puede producir una explosión si el contenido de  $O_2$  de la mezcla es menor del 13% independientemente del porcentaje de Metano presente en la mezcla, pero en la práctica por razones de seguridad, los tanques se purgan hasta que el contenido de  $O_2$  es menor del 2%. Esta operación se explicará con detalle más adelante.

Los vapores producidos por la vaporización normal de la carga (BOIL-OFF), son más ligeros que el aire cuando la temperatura del vapor está por encima de  $-110^{\circ}C$ , o en valores superiores dependiendo de la composición del LNG, por lo tanto cuando se ventee vapor de gas natural licuado a la atmósfera, el vapor tenderá a elevarse por encima de la salida o descarga desde la que se ventea y se dispersará muy rápidamente.



Imagen de los palos de ventee presentes en la cubierta Trunk del LNG/C Madrid Spirit. (Fuente: Jofre Enseñat)

Cuando se mezcla un vapor frío con el aire ambiental, la mezcla vapor-aire aparece como una nube blanca visible, debido a la condensación de la humedad del aire. Es seguro asumir que el rango de inflamabilidad de la mezcla vapor-aire no se extiende significativamente más allá del perímetro de la nube blanca.

La temperatura de auto-ignición del Metano, es decir la temperatura mínima a la que necesita calentarse el gas para que se produzca una auto-combustión sostenida sin necesidad de que exista una chispa o llama, es de 595°C.

### Propiedades físicas del metano

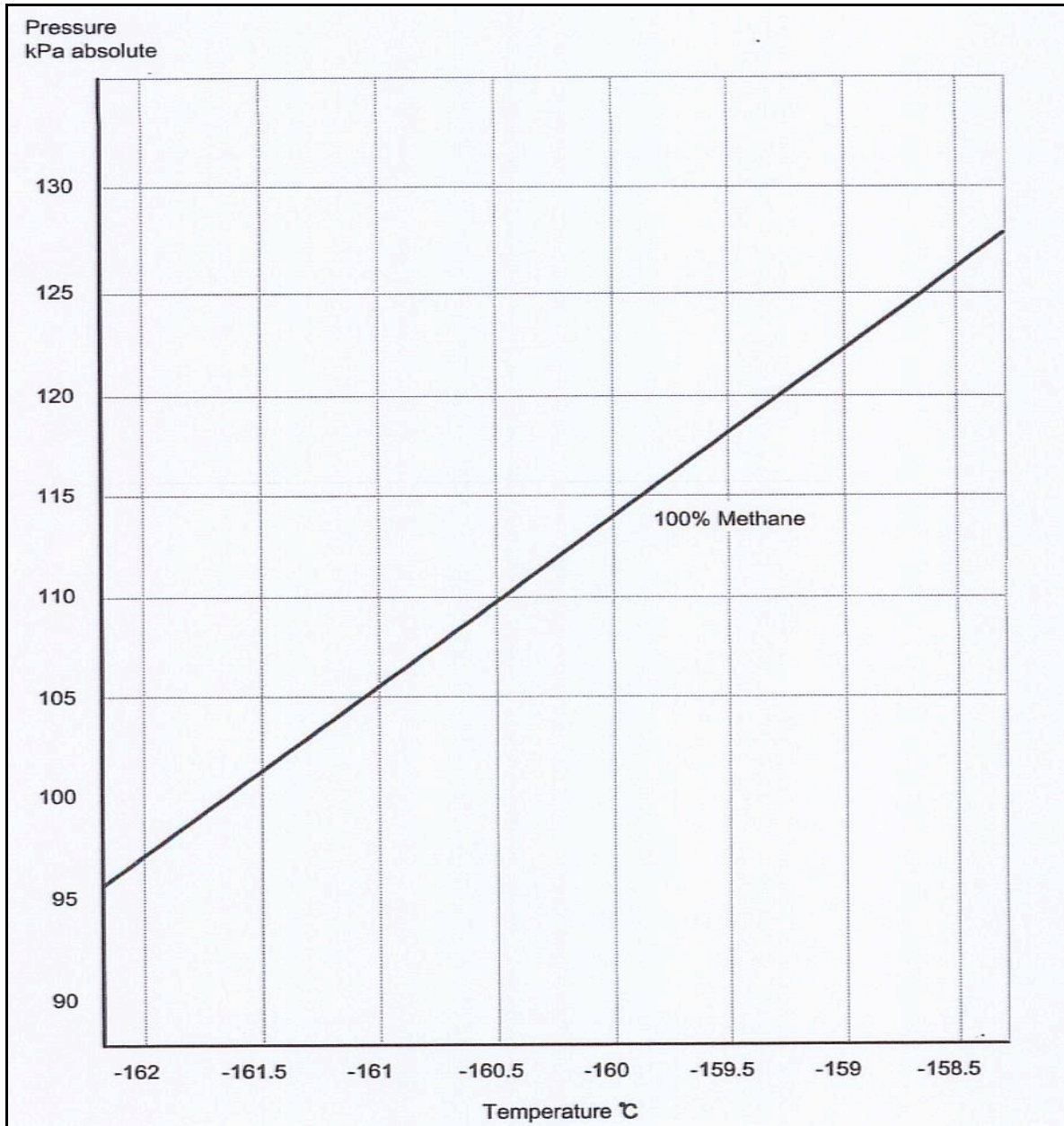
<b>Temperatura de ebullición atmosférica a 1 bar absoluto</b>	-161.5°C
<b>Densidad del líquido a la temperatura de ebullición atmosférica</b>	426.0 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Densidad del vapor a 15°C y a 1 bar absoluto</b>	0.554
<b>Proporción, volumen gas / volumen líquido a -161.5°C y 1 bar absoluto</b>	619
<b>Límites de inflamabilidad en aire, en %volumen</b>	5.3% - 14%
<b>Temperatura de auto-ignición</b>	595°C
<b>Máximo Calor específico a 15°C</b>	5550 kJ/Kg.
<b>Temperatura crítica<sup>3</sup></b>	-82.5°C
<b>Presión crítica<sup>4</sup></b>	43 bar abs.

### Variación del punto de ebullición del metano con la presión

El Punto de ebullición del Metano se incrementa con la presión, y esta variación se muestra en el diagrama para el Metano puro dentro de un rango normal de presiones a bordo del buque. La presencia de componentes más pesados en el LNG incrementa la temperatura de ebullición de la carga a una presión determinada.

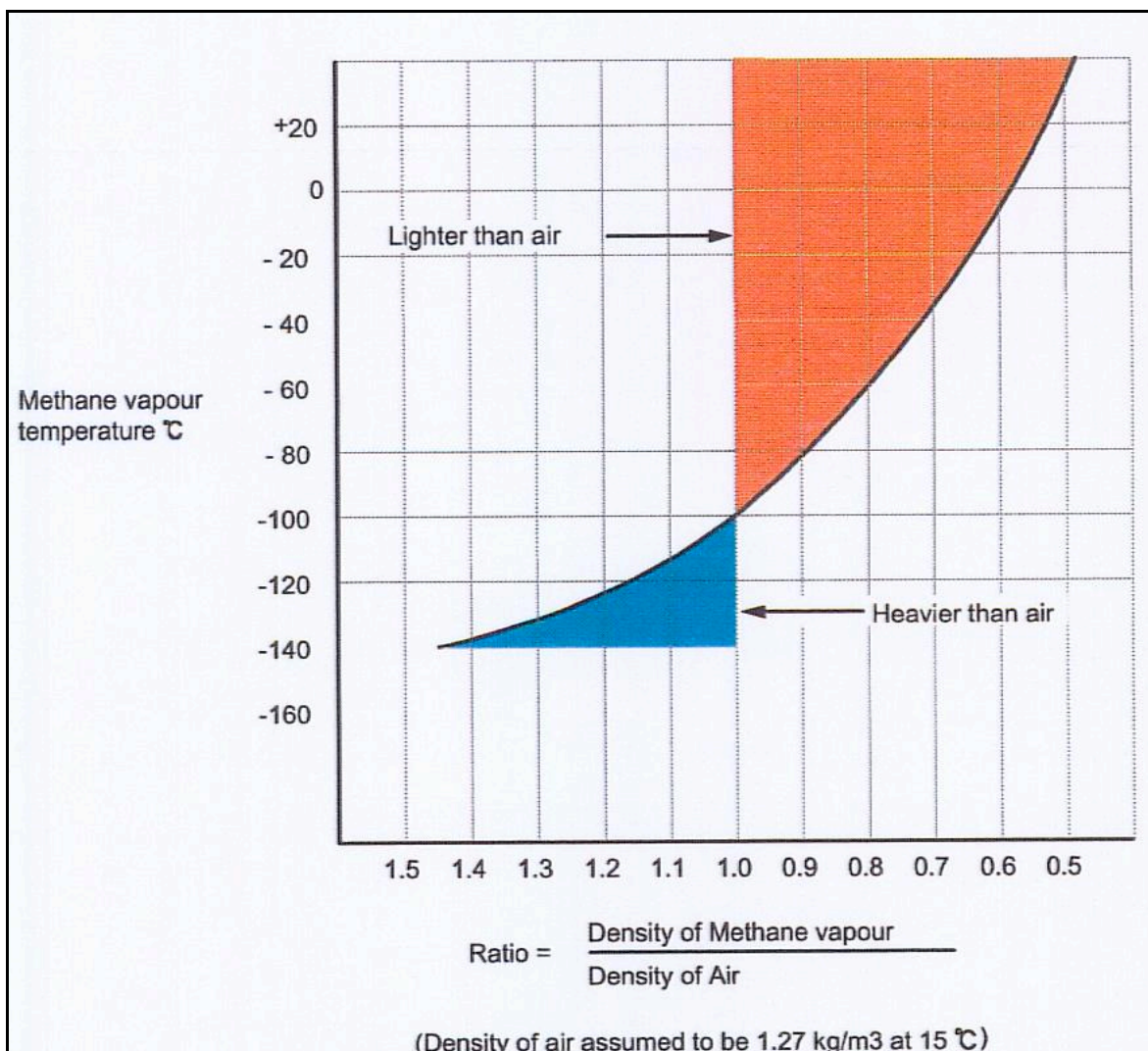
<sup>3</sup> Temperatura Crítica: Temperatura límite por encima de la cual un gas miscible no puede ser licuado por compresión.

<sup>4</sup> Presión Crítica: Característica de cada sustancia que define el campo en que esta puede transformarse en vapor en presencia del líquido correspondiente.



Variación del punto de ebullición del Metano con la presión. (Fuente: Manual de Carga del LNG/C Madrid Spirit)

La relación entre la temperatura de ebullición y la presión del LNG sigue aproximadamente una línea paralela a la que representa el comportamiento para el Metano puro.



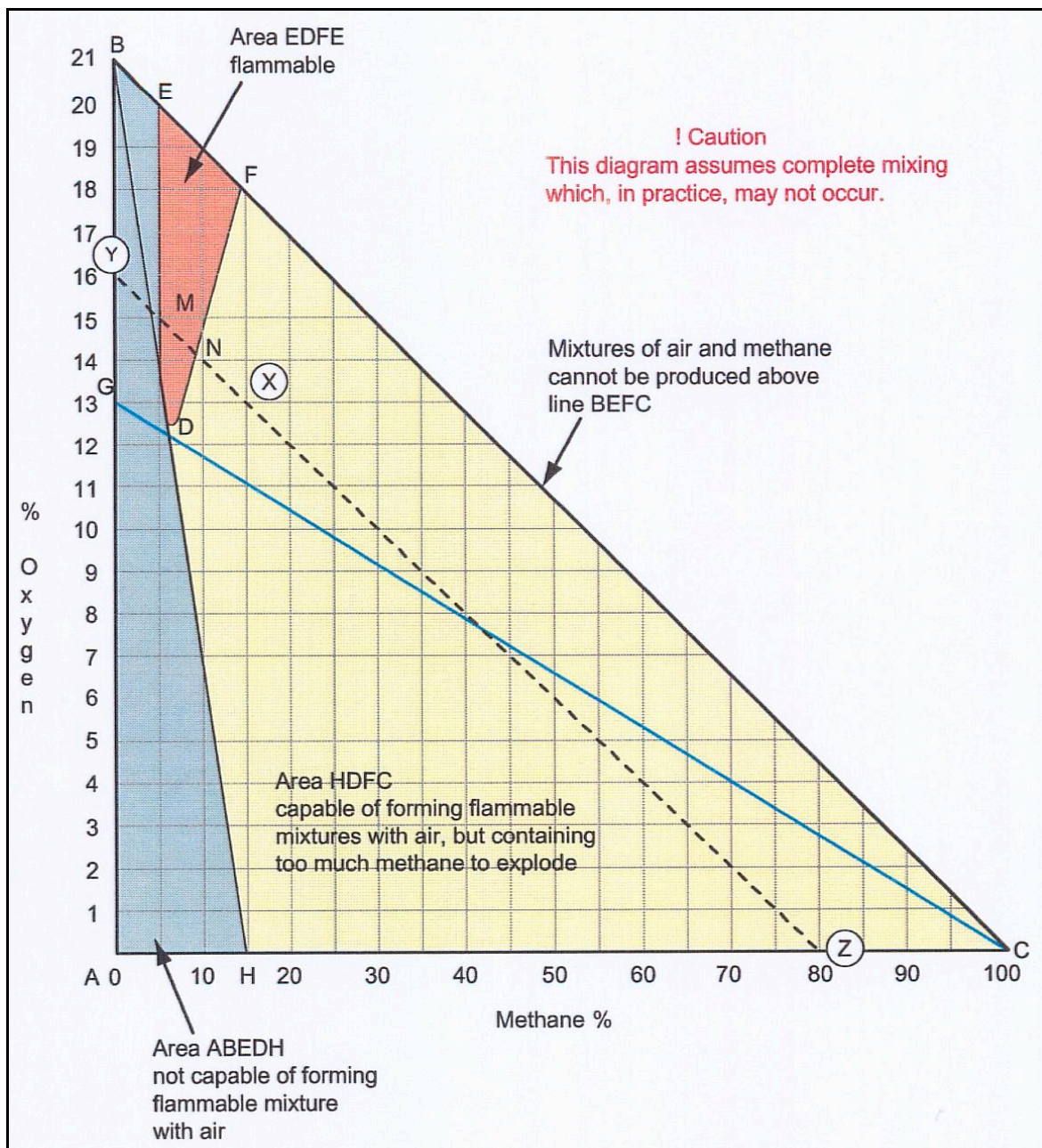
Relación entre las densidades del Gas Metano y el aire en función de la Temperatura del Metano.

(Fuente: Manual de Carga del LNG/C Madrid Spirit)

### 3.2 Inflamabilidad de mezclas de metano, oxígeno y nitrógeno

El buque debe ser operado de tal forma que la mezcla inflamable de Metano y aire sea evitada en todo momento. La relación entre la composición gas/aire y la inflamabilidad para las posibles mezclas de Metano, aire y Nitrógeno se muestra en el diagrama siguiente.





Inflamabilidad de mezclas de Metano, Oxígeno y Nitrógeno. (Fuente: Manual de Carga del LNG/C Madrid Spirit)

El eje vertical A-B representa mezclas de Oxígeno-Nitrógeno, sin presencia de Metano, en una escala del 0% de  $O_2$  (100% Nitrógeno) en el punto A, al 21% de  $O_2$  (79% de Nitrógeno) en el punto B. Este último punto representa la composición del aire atmosférico.

El eje horizontal A-C representa mezclas Metano-Nitrógeno, sin la presencia de  $O_2$ , en una escala del 0% Metano (100% Nitrógeno) en el punto A, a 100% de Metano (0% Nitrógeno) en el punto C.

Cualquier punto en el diagrama dentro del triángulo ABC, representa una mezcla de los 3 componentes, Metano, Oxígeno y Nitrógeno, cada uno presente en una determinada proporción del volumen total. Pueden extraerse del diagrama las proporciones de los tres componentes para un único punto.

Por ejemplo, en el punto D:

Metano:	6%, leído en el eje A-C
Oxígeno:	12.2%, leído en el eje A-B
Nitrógeno:	81.8%, el resto hasta el 100%

El diagrama consiste en 3 sectores principalmente:

Zona inflamable, área EDF. Cualquier mezcla cuya composición esté representada por un punto que se encuentre dentro de esta área es INFLAMABLE.

Área HDFC. Cualquier mezcla cuya composición esté representada por un punto que se encuentre dentro de esta área es capaz de formar una mezcla INFLAMABLE al mezclarse con aire, pero contiene demasiado Metano para encenderse.

Área ABEDH. Cualquier mezcla cuya composición esté representada por un punto que se encuentre dentro de esta área no es capaz de formar una mezcla INFLAMABLE al mezclarse con aire.

### Utilización del diagrama

Asumiendo que el punto Y en el eje Oxígeno-Nitrógeno está unido al punto “Z” en el eje Metano-Nitrógeno por una línea recta. Si una mezcla Oxígeno-Nitrógeno de composición “Y” se mezcla con una mezcla Metano-Nitrógeno de composición “Z”, la composición de la mezcla resultante, estará representada en todo

momento por el punto “X”, el cual se moverá de “Y” a “Z”, según se incrementen las cantidades de la mezcla “Z”.

### **Aplicación a la operación de puesta en gas**

Aplicando este proceso a la inertización de los tanques de carga antes de realizar la operación de enfriamiento de los tanques de carga, asumamos que los tanques inicialmente están totalmente llenos de aire, punto “B”. Se añade Nitrógeno hasta que el contenido de Oxígeno se reduce a un 13%, punto “G”. La adición de Metano hará que la mezcla resultante cambie a lo largo de la línea “GDC” la cual no pasa por la zona inflamable, pero es tangencial a esta en el punto “D”. Si más tarde, se reduce el contenido de Oxígeno, antes de añadir Metano, a cualquier punto cuyo porcentaje de Oxígeno este entre el 0% y el 13%, esto es, entre los puntos “A” y “G”, el cambio en la composición que se originará con la adición de Metano, no pasará a través de la zona inflamable.

Teóricamente, por lo tanto, solo es necesario añadir Nitrógeno al aire mientras se inertiza hasta que el contenido de Oxígeno se reduzca a un 13%. Sin embargo, el contenido de Oxígeno se reduce a un 2% durante la inertización, porque, en la práctica, no puede producirse una mezcla o dilución completa del aire con el Nitrógeno.

### **Aplicación a la operación de inertado**

Cuando se vaya a inertizar un tanque lleno de gas Metano, antes de airearlo, se sigue un procedimiento similar. Se asume que se añade Nitrógeno al tanque que contiene Metano en el punto “C”, hasta que el contenido de Metano se reduzca al 14%, en el punto “H”. Según se añada aire, la composición de la mezcla cambiará a lo largo de la línea “HDB”, la cual es tangente en “D” a la zona inflamable, pero no pasa a través de ella. Por la misma razón que cuando se inertiza un tanque que contiene aire, cuando se inertiza un tanque lleno de Metano es necesario hacerlo hasta estar bien por debajo de la concentración teórica de Metano, reduciendo la misma hasta el 5%, porque en la práctica, no es posible una mezcla completa del Metano y el Nitrógeno

El procedimiento para evitar una mezcla inflamable en los tanques de carga y líneas, se resume como sigue:

Tanques y líneas que contengan aire se inertizarán con Nitrógeno hasta que todos los puntos de toma de muestras indiquen 5% o menos porcentaje de Oxígeno, antes de admitir gas Metano.

Tanques y líneas que contengan Metano se inertizarán con Nitrógeno hasta que todos los puntos de toma de muestras indiquen 5% o menos porcentaje de Metano, antes de admitir aire.

Se debe tener en cuenta que algunos instrumentos portátiles para medir el contenido de Metano están basados en la oxidación de la muestra sobre un alambre de Platino caliente y posterior medición del aumento de temperatura debido a esta combustión. No se usarán este tipo de analizadores en mezclas de Nitrógeno-Metano, pues no contienen Oxígeno. Por esta razón se han desarrollado analizadores portátiles de tipo infrarrojo que son suministrados a los buques con este propósito.



(a)



(b)

Vista de los dos modelos de analizadores portátiles de metano presentes a bordo. El modelo (a) es usado para entrar al interior de los tanques de lastre y *cofferdams*, mientras que el modelo (b) es el que se usa para medir el contenido de metano de las barreras primaria y secundaria.



### **3.3 Comportamiento del LNG en los tanques de carga**

Una vez cargado en los tanques de carga, la presión de la fase vapor se mantiene prácticamente constante, en un valor ligeramente superior al de la presión atmosférica.

El calor exterior que pasa a través de los aislamientos del tanque genera unas corrientes de convección dentro de la carga a granel de LNG de forma que el gas natural licuado calentado sube a la superficie y se vaporiza o evapora.

El calor necesario para la evaporación proviene del LNG y mientras se remueva el vapor de LNG producido, manteniendo la presión prácticamente constante en el interior del tanque de carga, el gas natural licuado permanecerá a su temperatura de ebullición a presión atmosférica.

Si la presión del vapor se reduce eliminando o removiendo más vapor del generado, la temperatura del LNG disminuirá. Para mantener la presión de equilibrio correspondiente a esa temperatura, la evaporación del LNG se acelera, resultando en un incremento de transferencia de calor del LNG al vapor.

Si la presión del vapor aumenta removiendo o eliminando menos vapor que el generado, la temperatura del LNG aumentará. Para reducir la presión a un valor que se corresponda con el de equilibrio con su temperatura, la evaporación de LNG se reduce, al tiempo que la transferencia de calor del LNG al vapor se reduce.

El gas natural licuado es una mezcla de varios componentes con diferentes propiedades físicas, en particular con diferentes grados o ritmos de vaporización; las fracciones más volátiles de la carga vaporizan a un ritmo mayor que las fracciones menos volátiles. El vapor generado por la vaporización o ebullición de la carga contiene una mayor concentración de las fracciones más volátiles que el gas natural licuado.

Las propiedades del gas natural licuado, como por ejemplo el punto o temperatura de ebullición, la densidad y su valor calorífico, tienen tendencia a incrementarse durante el viaje.

### **3.4 Sloshing - movimiento libre del líquido en los tanques**

De la experiencia adquirida de los primeros buques metaneros construidos y puestos en servicio y a partir de un gran número de análisis y pruebas realizadas a modelos y estudios realizados por ordenador, GAZ TRANSPORT ha diseñado nuevos tanques los cuales se hayan prácticamente libres de los riesgos originados por el movimiento o chapoteo libre del líquido en el interior de los tanques de carga.

Los tanques de carga del buque han sido diseñados para limitar las fuerzas de impacto originadas por el movimiento libre del líquido, y el margen de seguridad tenido en cuenta ha sido considerablemente ampliado. Sin embargo los operadores de los buques deberían tener siempre en cuenta la existencia de un riesgo potencial para el sistema de contención de la carga y también para el equipamiento de los tanques de carga debido al movimiento libre del líquido en el interior de los tanques de carga (*Sloshing*).

#### **Precauciones a tomar para evitar daños debido al sloshing**

##### **- En cuanto a los niveles de líquido en los tanques de carga:**

La primera precaución es mantener los niveles dentro de los límites siguientes: más bajo que el nivel correspondiente al valor del 10% de la eslora del tanque de carga de que se trate y/o más alto que el nivel correspondiente al valor del 70% de la altura del tanque en cuestión.

##### **- En cuanto al movimiento del buque:**

La segunda precaución a tener en cuenta es tratar de limitar el movimiento del buque entre las olas, el cual genera el movimiento libre del líquido en los tanques de carga (*Sloshing*). La amplitud de los movimientos del líquido depende de la condición que se tenga de mar, tipo y evolución de las olas, del asiento y de la velocidad del buque.

### 3.5 Gas natural y medio ambiente

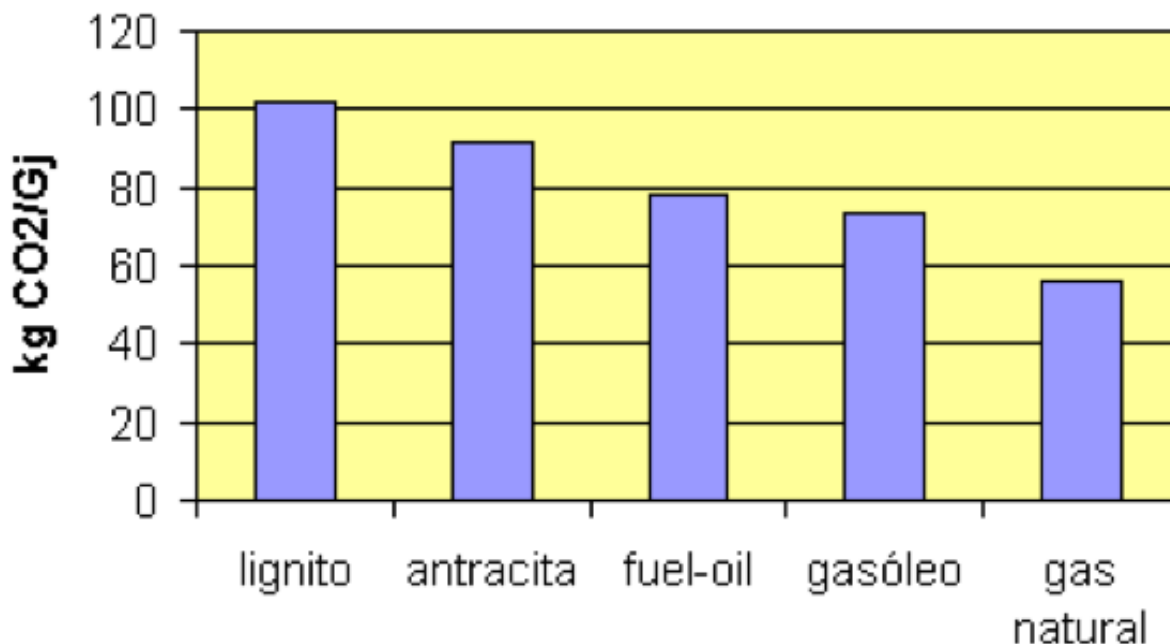
El impulso al gas natural forma parte de la estrategia energética española desde hace más de dos décadas. El motivo no es otro que sus cualidades medioambientales y el actual volumen de reservas mundial que garantiza una utilización comercial sostenible en las próximas siete décadas.

Según definición de la Secretaría de Estado de la Energía, perteneciente al Ministerio de Industria, Comercio y Turismo *“El gas natural es el combustible fósil con menor impacto medioambiental de todos los utilizados, tanto en la etapa de extracción, elaboración y transporte, como en la fase de utilización”*.

*“Respecto a la fase de extracción, la única incidencia medioambiental está ligada a los pozos en los que el gas natural se encuentra ligado a yacimientos de petróleo que carecen de sistemas de reinyección. En esos casos el gas se considera como un subproducto y se quema en antorchas. Por otro lado, la transformación es mínima, limitándose a una fase de purificación y en algunos casos, eliminación de componentes pesados, sin emisión de efluentes ni producción de escorias”*.

Las consecuencias atmosféricas del uso del gas natural son menores que las de otros combustibles por las siguientes razones:

- Su uso como energía primaria no requiere ningún tipo de transformación y su reducida emisión de partículas en la combustión lo hacen idóneo para su uso en cualquier proceso productivo que demande energía térmica, incluido el sector terciario.
- Su pureza contribuye a su utilización en la generación eléctrica de forma eficiente como por ejemplo en Centrales de ciclo combinado donde se alcanzan rendimientos superiores al 55%, en generación distribuida a través de sistemas de cogeneración, etc.
- La ausencia de emisiones de partículas y de óxidos de azufre le configuran como el mejor combustible fósil para vehículos, tanto privados como públicos, mejorando la calidad medioambiental del aire de las grandes ciudades.



Emisión de CO<sub>2</sub> en la combustión. (Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio)

### Emisiones de CO<sub>2</sub>

El gas natural como cualquier otro combustible produce CO<sub>2</sub>; sin embargo, debido a la alta proporción de hidrógeno-carbono de sus moléculas, sus emisiones son un 40-50% menores de las del carbón y un 25-30% menores de las del fuel-oil.

### Emisiones de NO<sub>x</sub>

Los óxidos de nitrógeno se producen en la combustión al combinarse radicales de nitrógeno, procedentes del propio combustible o bien, del propio aire, con el oxígeno de la combustión. Este fenómeno tiene lugar en reacciones de elevada temperatura, especialmente procesos industriales y en motores alternativos, alcanzándole proporciones del 95-98% de NO y del 2-5% de NO<sub>2</sub>. Dichos óxidos, por su carácter ácido contribuyen, junto con el SO<sub>2</sub> a la lluvia ácida y a la formación del "smog" (término anglosajón que se refiere a la mezcla de humedad y humo que se produce en invierno sobre las grandes ciudades).

La naturaleza del gas (su combustión tiene lugar en fase gaseosa) permite alcanzar una mezcla mas perfecta con el aire de combustión lo que conduce a combustiones completas y más eficientes, con un menor exceso de aire.

La propia composición del gas natural genera dos veces menos emisiones de NOx que el carbón y 2,5 veces menos que el fuel-oil. Las modernas instalaciones tienen a reducir las emisiones actuando sobre la temperatura, concentración de nitrógeno y tiempos de residencia o eliminándolo una vez formado mediante dispositivos de reducción catalítica.

### **Emisiones de SO<sub>2</sub>**

Se trata del principal causante de la lluvia ácida, que a su vez es el responsable de la destrucción de los bosques y la acidificación de los lagos. El gas natural tiene un contenido en azufre inferior a las 10ppm (partes por millón) en forma de odorizante, por lo que la emisión de SO<sub>2</sub> en su combustión es 150 veces menor a la del gas-oil, entre 70 y 1.500 veces menor que la del carbón y 2.500 veces menor que la que emite el fuel-oil.

### **Emisiones de CH<sub>4</sub>**

El metano, que constituye el principal componente del gas natural es un causante del efecto invernadero mas potente que el CO<sub>2</sub>, aunque las moléculas de metano tienen un tiempo de vida en la atmósfera más corto que el del CO<sub>2</sub>. De acuerdo con estudios independientes, las perdidas directas de gas natural durante la extracción, transporte y distribución a nivel mundial, se han estimado en 1% del total del gas transportado.

La mayor parte de las emisiones de metano a la atmósfera son causadas por la actividad ganadera y los arrozales, que suponen alrededor del 50% de las emisiones causadas por el hombre.

### **Partículas sólidas**

El gas natural se caracteriza por la ausencia de cualquier tipo de impurezas y residuos, lo que descarta cualquier emisión de partículas sólidas, hollines, humos, etc. y además permite, en muchos casos el uso de los gases de combustión de forma directa (cogeneración) o el empleo en motores de combustión interna.



## **CAPÍTULO 4**

### **Descripción del equipamiento y sistema de carga y descarga de un buque metanero**



Vista general de la cubierta del LNG/C Madrid Spirit desde el Puente (Fuente: Jofre Enseñat)





## 4.1-Sistema de líneas relacionadas con la carga

### 4.1.1 Descripción general

El Gas Natural Licuado es cargado y descargado a través de dos líneas principales transversales, en dirección babor-estribor situadas en la parte central de la cubierta del buque, líneas *crossover*, y llevada hasta o desde el domo de líquido de cada tanque mediante la línea general de líquido que discurre en dirección proa-popa a lo largo de la cubierta. Cada línea *crossover* se divide en dos conexiones para carga/descarga, babor y estribor, sumando un total de cuatro conexiones para carga/descarga en cada costado del buque, además de una conexión para el vapor.



Vista del manifold de Babor del buque. (Fuente: Jofre Enseñat)

Los domos o cúpulas de vapor de cada tanque de carga se mantienen comunicados con el resto a través de la línea general de vapor que discurre de proa a popa. La línea principal o general de vapor también dispone de una línea

transversal *crossover* en el *manifold* para regular la presión de los tanques durante las operaciones de carga o descarga.

En las operaciones de carga, el gas desplazado de los tanques se retorna a tierra por medio de los compresores de alto rendimiento “HD” a través de la línea general de vapor. En las operaciones de descarga, la línea general de vapor se utiliza junto con las líneas transversales *crossover*, o con un vaporizador, en caso de que no se pueda disponer de vapor retornado desde tierra, para suministrar vapor a los tanques para reemplazar el líquido descargado.

La línea de reachique/enfriamiento puede conectarse a las líneas transversales de líquido *crossover*, para su drenaje, para el enfriamiento de cada tanque de carga o también para pulverizar gas natural líquido dentro de los tanques de carga durante la descarga si el retorno de vapor es insuficiente.

La línea general de vapor y la línea general de reachique/enfriamiento están conectadas al domo de vapor de cada tanque de carga. En los domos de vapor también encontramos las tuberías que llevan a las válvulas de seguridad de los tanques de carga, sensores de presión y tres puntos de toma de muestras.

La línea de enfriamiento en cada uno de los tanques de carga consiste en dos líneas situadas en la parte superior de cada tanque que distribuyen el líquido entrante a varias boquillas pulverizadoras para ayudar a la vaporización y así alcanzar un mejor ritmo de enfriamiento.

Las líneas de reachique/enfriamiento, líquido y vapor tienen ramales desde y hacia el cuarto de compresores, con conexiones a los compresores, calentadores y vaporizadores para poder realizar varias funciones auxiliares. Existen conexiones portátiles, para acoplar donde sea necesario, que permiten la conexión entre varias líneas cuando se efectúen tareas infrecuentes como la preparación de los tanques para entrada en dique seco o para su preparación posterior previa a la entrada de nuevo en servicio u operación. Las bombas que se destinan a tal efecto están situadas en el cuarto de compresores y motores eléctricos.

La línea general de vapor conecta los domos de vapor entre si para el venteo del gas o vapor procedente de la evaporación natural de la carga “*boil-off*” en caso

necesario, el cual es descargado a la atmósfera a través del palo de venteo número uno. Del cuarto de compresores sale una línea de vapor más pequeña que conduce el *boil-off* a la sala de máquinas, para ser usado como combustible, por medio de los compresores de bajo rendimiento “LD” y los calentadores de *boil-off* o calentadores de metano.

El sistema de gas inerte/aire seco, situado en la sala de máquinas, es usado para suministrar gas inerte o aire seco a los tanques de carga a través de las líneas que conectan con el sistema de carga, pasando por una doble válvula de no retorno que evita su retorno a la sala de máquinas.

Toda la línea de carga está soldada sin que haya uniones por las que se pueda producir un derrame. En el resto de las líneas, donde existen bridas de unión, en las expansiones, válvulas u otros equipos se colocan pletinas que aseguran la continuidad de estas líneas evitando diferencias de potencial, debido a la electricidad estática, que se podrían producir entre las líneas de carga y el resto de líneas, tanques, válvulas y otros equipos.

Tanto el sistema de líneas de líquido como el de líneas de vapor están diseñados de tal forma que tanto las expansiones como las contracciones son absorbidas por la configuración de dichas líneas. Esto se consigue por medio de expansiones. Las líneas cuentan con abarcones fijos y puntos de apoyo por donde son guiadas sin hacerlas firmes. Estos sistemas aseguran que los esfuerzos sean mantenidos dentro de unos límites aceptables.



(a)



(b)

Imágenes de las Expansiones de las líneas de cubierta (a) y de los puntos de apoyo no fijos (b).

(Fuente: J. Enseñat)



Todas las secciones de la línea de líquido que pueden quedar aisladas entre dos válvulas, quedando líquido en ellas entre las válvulas cerradas, disponen de válvulas de seguridad las cuales alivian el exceso de presión al domo de vapor más cercano. Esta es una medida de seguridad, aunque la práctica habitual es permitir que este líquido se caliente y se vaporice antes de cerrar dichas válvulas.

Todas las válvulas principales, como son las de los *manifolds*, situadas en las conexiones de los costados de babor y estribor del buque para conectar con los brazos de carga de tierra (también llamadas válvulas ESD), así como las válvulas individuales de carga y de descarga, son operadas remotamente desde el control de carga del buque (IAS), por lo que las operaciones normales de carga pueden llevarse a cabo desde el control de carga.

Cuando la parada de emergencia (ESD) es activada, las válvulas de los *manifolds* se cierran, de forma que la operación de carga o descarga queda detenida.

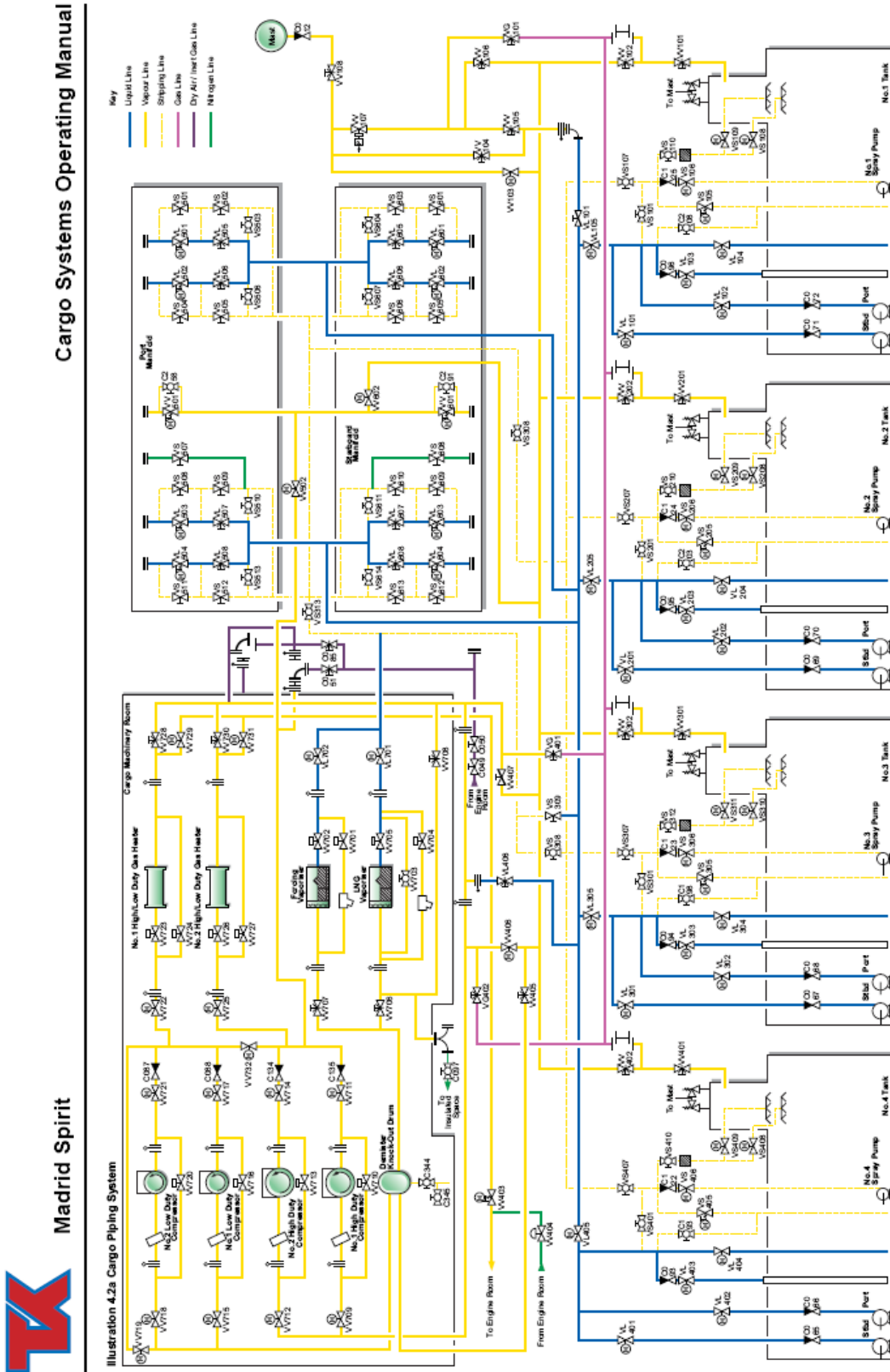
En la descarga de cada bomba de carga se dispone de una válvula de no retorno. Esta válvula está perforada en el disco, dispone de un agujero de 6mm. de diámetro, para permitir el drenaje de la línea, la salida del vapor una vez calentado el líquido, y para permitir realizar operaciones de puesta del buque en condición de “libre de gas”. Los compresores también cuentan con válvulas de no retorno en sus descargas. Las líneas de reachique/enfriamiento y las de las bombas de emergencia tienen válvulas de no retorno localizadas después de la válvula hidráulica de descarga.

En el interior del tanque de carga, la parte superior de cada línea de descarga de las bombas de descarga dispone de un pequeño pulverizador o rociador para enfriar las patas de la torre soporte de las bombas de descarga durante toda la operación de descarga.

Imagen de la torre o “Trípode” donde se monta la bomba de descarga de cada tanque.

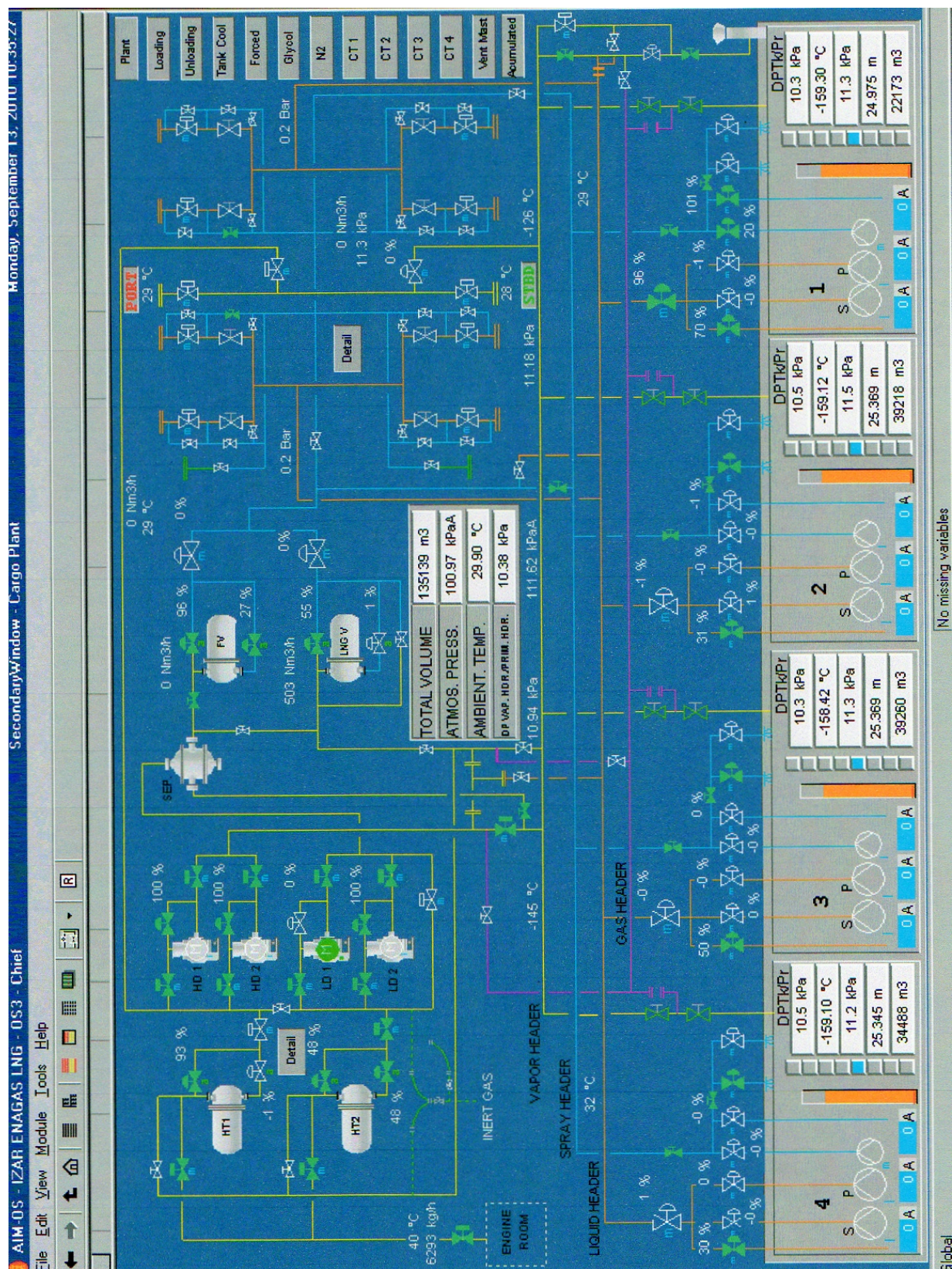
(Fuente: Vaudolon, Alain. Liquefied Gases. Marine Transportation and Storage. Whitherby Publishers. 2000.)





Esquema de todo el sistema de carga. (Fuente: Manual de carga del LNG/C Madrid Spirit)





Esquema IAS de la Planta de Carga. (Fuente: IAS del buque LNG/C Madrid Spirit)



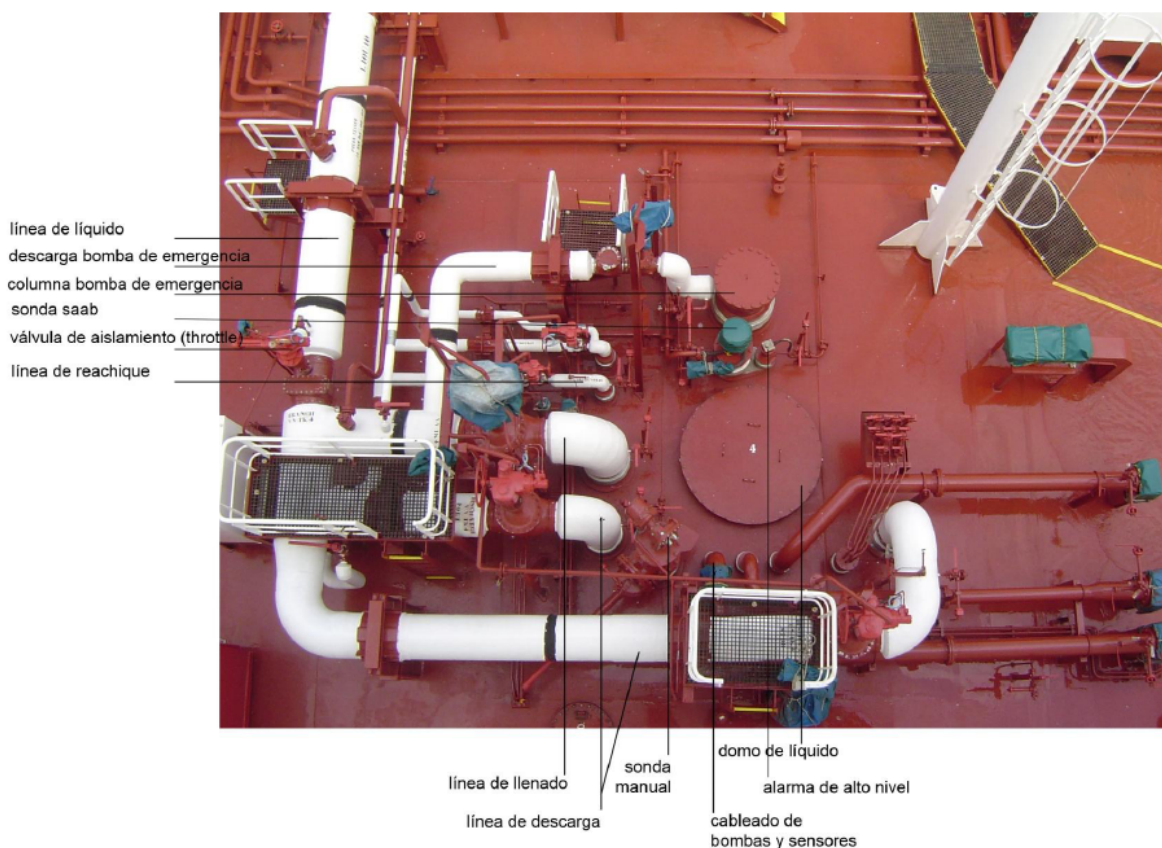
#### 4.1.2 Línea de líquido

El sistema comprende una línea 600\450 A de acero inoxidable criogénico que conecta cada uno de los cuatro tanques con los *manifolds* de carga/descarga en los costados del buque por medio de una línea común o general.

En el domo de líquido de cada tanque existe una unión entre la línea de carga o de llenado de líquido, y las líneas de descarga de las bombas de carga para permitir realizar las operaciones de carga o descarga por una misma línea.

Esta unión conecta las líneas de descarga de las bombas de babor y estribor con la línea de carga, la descarga de la bomba de emergencia y la línea de reachique/enfriamiento.

Los tanques No.2 y No.3 tienen la posibilidad de llenar la tubería de descarga en el tanque hasta la válvula de descarga en cubierta antes de arrancar las bombas de carga para evitar los golpes de ariete.



Vista en planta del domo de líquido del tanque No.4. (Fuente: Jofre Enseñat)

A lo largo de la línea de líquido encontramos bridas ciegas y puntos de toma de muestras que facilitan el inertado y la puesta en aire del sistema en caso de reparación.

Todas las secciones de la línea de líquido que quedan fuera de los tanques de carga están aisladas con una espuma de poliuretano rígida cubierta para evitar el agua y la humedad.

#### 4.1.3 Línea de vapor

El sistema comprende una línea de 700\600\500\350 A, de acero inoxidable criogénico que conecta cada uno de los cuatro tanques de carga por medio de una línea común o general de vapor, con los *manifolds* de vapor en los costados del buque, el cuarto de compresores y el palo de venteo número 1 de proa.



válvula alivio presión

domo de vapor

sistema detección gas

línea de enfriamiento  
(anillos rociadores)

comunicación tanque-aislamiento primario

purga domo

línea de vapor

Vista general del domo de vapor del tanque No.1. (Fuente: Jofre Enseñat)



La línea que conecta con el cuarto de compresores permite que el vapor se utilice de las siguientes formas:

- Enviarlo a tierra cuando se carga, por medio de los compresores de alto rendimiento (HD), para controlar la presión en los tanques de carga.
- Enviar el vapor generado u originado por la vaporización natural de la carga (*boil-off*), a la máquina, una vez calentado, a través de los compresores de bajo rendimiento (LD), para su utilización como combustible en las calderas durante la navegación en condición de carga o en lastre.
- Durante las operaciones de puesta en gas y puesta en aire, se vaporiza gas que es utilizado para purgar/secar los tanques.

La línea que se dirige hacia el palo de venteo numero 1 actúa como una válvula de seguridad de todos los tanques y se utiliza para controlar la presión de los tanques durante las operaciones normales.

Al igual que la línea de líquido, la línea de vapor también dispone de bridas ciegas y puntos de toma de muestras para facilitar el inertado y la puesta en aire del sistema en caso de reparaciones.

Estas líneas también están aisladas con espuma rígida de poliuretano.

#### **4.1.4 Línea de reachique / Enfriamiento**

El sistema comprende una línea de 80\65 A soldada a paño, de acero inoxidable criogénico que conecta las bombas de reachique/enfriamiento de cada uno de los tanques de carga con la línea general de reachique/enfriamiento y se utiliza en las formas siguientes para suministrar gas natural licuado:

- A las líneas de pulverizadores o rociadores en cada tanque utilizadas para la vaporización del líquido y enfriamiento de los tanques.
- A la línea general de líquido para realizar el enfriamiento previo a las operaciones de carga/descarga de esta línea.

- A las líneas de cebado de las tuberías de descarga de las bombas de los tanques No.2 y No.3 para evitar golpes de ariete cuando se arranquen las bombas de carga.
- A los vaporizadores de metano, tanto al vaporizador de gas natural licuado como al vaporizador forzado (cuya diferencia explicaremos más adelante).

En ciertos puntos de la línea de *spray* hay instaladas bridas ciegas y puntos de toma de muestras para permitir el inertado o la puesta en aire en caso de reparaciones.

Esta línea también está aislada con espuma rígida de poliuretano.

#### **4.1.5 Línea de gas – Operación en un único tanque**

El sistema comprende una línea de acero inoxidable 300 A, la cual puede conectarse con la línea general de vapor en cubierta y el palo de venteo número 1 cuando queremos trabajar en un único tanque.

La utilización de esta línea permite aislar un tanque (o los que sean necesarios) para su reparación si fuera necesario sin tener que calentar, inertar y ventilar el resto de tanques.

La conexión a cada uno de los tanques (individualmente) se hace mediante una reducción o pieza portátil que se coloca retirando dos bridas ciegas situadas en los domos de vapor en la línea de vapor de cada tanque y en la línea general de gas.

Durante la operación de un único tanque es posible conectar con el generador de gas inerte por medio de una pieza o carrete portátil.

Como en las líneas descritas anteriormente, esta línea también está equipada con bridas ciegas y puntos de toma de muestras para permitir el inertado y la puesta en aire del sistema en caso de reparación.

#### 4.1.6 Línea de vapor / Gas a la máquina

Durante el transporte de gas natural licuado por mar, el líquido se vaporiza debido a la transferencia de calor proveniente del aire y del agua de mar exteriores a la carga a través del aislamiento de los tanques. También se produce una absorción de energía por parte de la carga debido al movimiento del buque.



En la imagen, (a) es la línea de Gas Inerte/Aire Seco que proviene de la máquina y (b) es la línea que lleva el Gas Metano hacia la máquina. (Fuente: Jofre Enseñat)

En condiciones normales, el *boil-off*, gas generado por la vaporización natural del gas natural licuado, es utilizado como combustible en las calderas del buque.

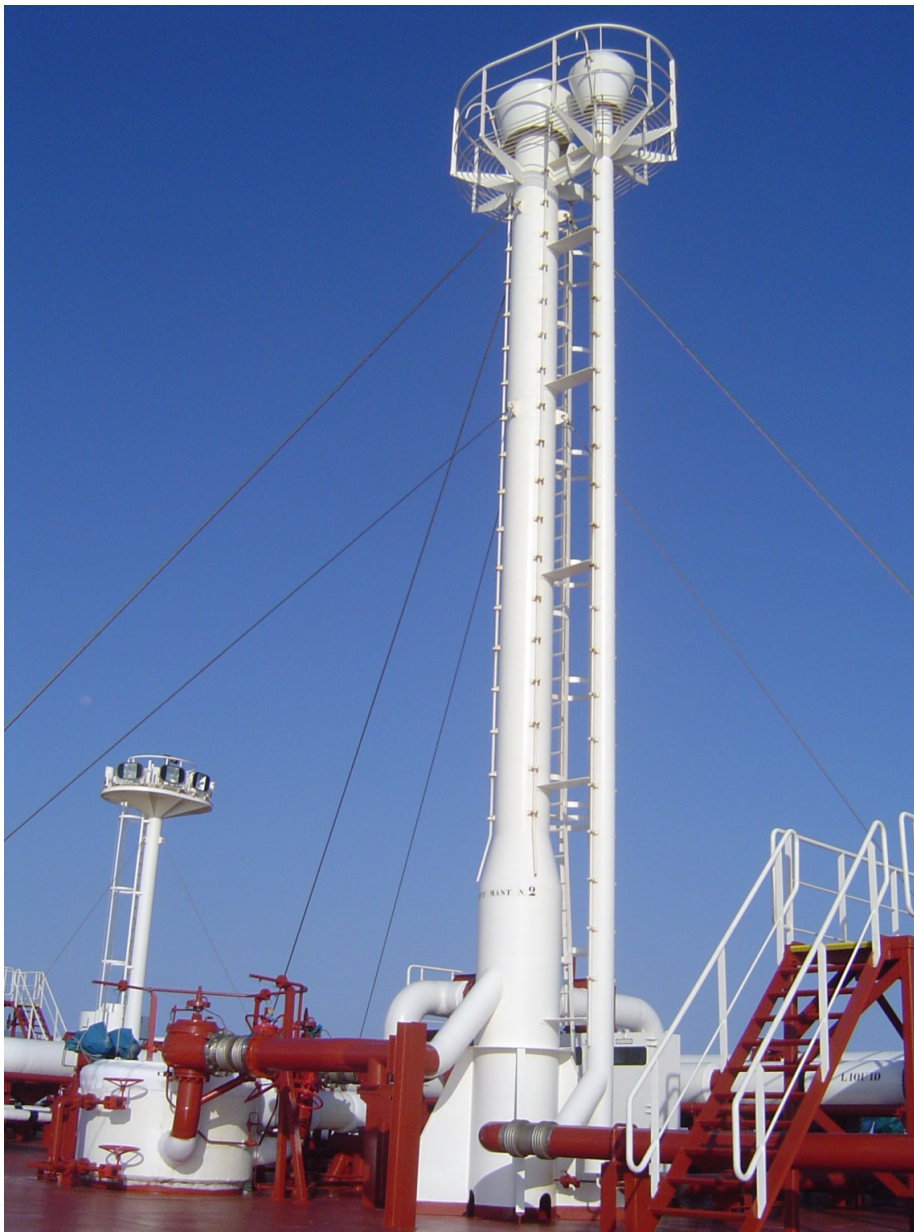
El vapor se toma de la línea general de vapor, se pasa a través del separador de vapor (*Demister*), por el compresor de bajo rendimiento (LD), y por último a través del calentador de metano, donde se le aumenta la temperatura antes de enviarlo a las calderas del buque donde es quemado como combustible.

#### 4.1.7 Línea de venteo

Durante las operaciones normales del buque, la presión de los tanques se controla utilizando el *boil-off* en las calderas como combustible, o a través de la línea de vapor y el palo de venteo de proa, palo de venteo número 1.

Cada tanque de carga está equipado con medios independientes de venteo, los cuales comprenden dos líneas de 250 A que salen de la parte superior de cada tanque (por el domo de vapor) que conectan con sus respectivas válvulas de alivio de seguridad operadas por una válvula piloto. De aquí el gas pasa a través de una línea de 300 A y/o 450 A hacia el palo de venteo donde es expulsado o venteado a la atmósfera.

Todos los palos de venteo están equipados con un sistema de Nitrógeno para la sofocación de posibles incendios en el palo.



Vista del palo de venteo No.2.así como de todas las líneas que llegan a él. (Fuente: Jofre Enseñat)



Al igual que las líneas descritas con anterioridad, esta línea también cuenta con bridas ciegas y puntos de toma de muestras. Las secciones de la línea que están fuera de los tanques están aisladas con espuma de poliuretano.

#### 4.1.8 Línea de gas inerte / Aire seco

El sistema comprende una línea de 450mm. dispuesta con bridas ciegas que suministra gas inerte/aire seco a los tanques de carga y resto de líneas para su inertado y secado en caso de tener que realizar reparaciones.

El gas inerte/aire seco se suministra desde la planta de gas inerte situada en la sala de máquinas.

La línea se conecta a la línea general de gas y a la general de líquido por medio de reducciones portátiles. Mediante el uso de reducciones y manguerotes flexibles es posible inertar/ventilar uno o todos los tanques.

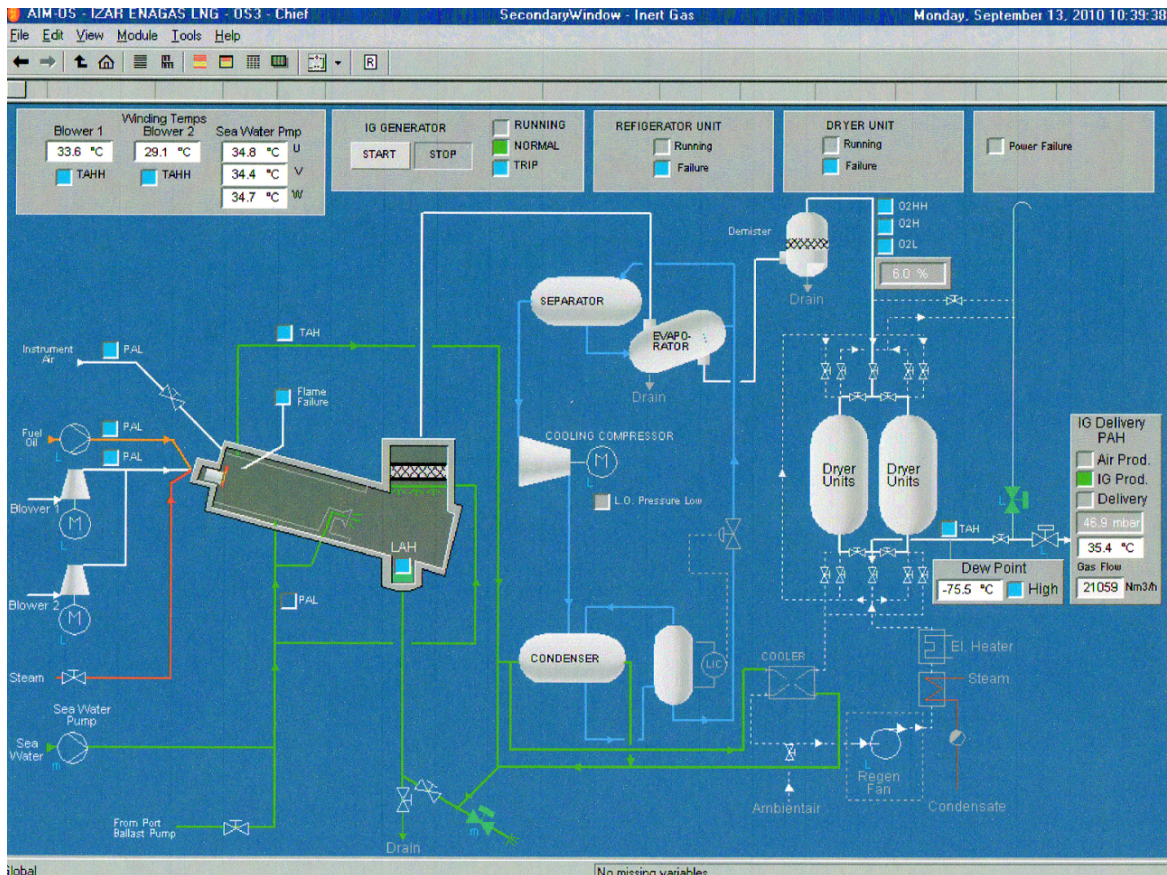


Imagen IAS del Sistema de Gas Inerte / Aire Seco. (Fuente: IAS del buque LNG/C Madrid Spirit)

## 4.2 Equipamiento de los tanques de carga

### 4.2.1 Descripción general

Un domo o cúpula de vapor está localizado cerca del centro geométrico de cada parte superior o cielo de los tanques de carga. Cada domo de vapor está provisto del siguiente equipo:

Una línea suministro/retorno de vapor, para suministrar vapor al tanque cuando se está descargando, desalojar o ventear vapor del tanque durante la carga, y también para desalojar el *boil-off* cuando los tanques contienen algo de carga.

Dos líneas de rociadores para realizar el enfriamiento del tanque.

Dos válvulas de alivio presión/vacío timbradas a 24 KPa absolutos y a -1 KPa absoluto de vacío, las cuales ventean al palo de venteo más cercano.

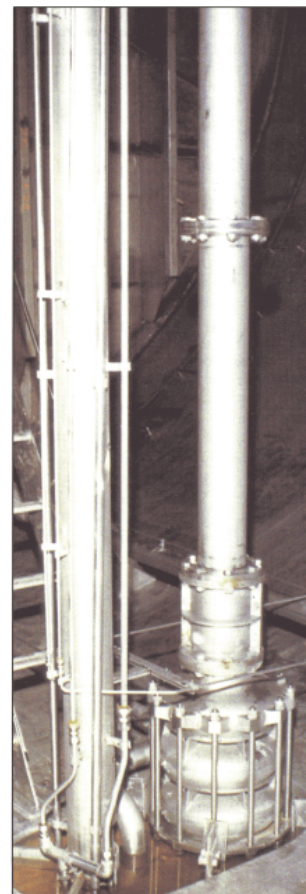
Tuberías para alimentación de los sensores de presión.

Exhaustaciones provenientes de las válvulas de seguridad de las líneas de líquido.

Además, cada tanque de carga tiene un domo de líquido localizado cerca de la línea diametral del buque en la parte de popa del tanque. Bajo el domo de líquido se encuentra la denominada torre, una especie de trípode construido en acero inoxidable (304L) que contiene o soporta las tuberías principales de carga y descarga, así como el pozo para la bomba de descarga de emergencia, formando una estructura de tres patas que así mismo soporta la escalera de acceso al tanque de carga, otras tuberías y equipo de instrumentación.

La instrumentación incluye sensores de temperatura y de nivel, sensores independientes de alto nivel y cables eléctricos de las bombas de descarga.

Imagen de la bomba de descarga o de pozo profundo montada en cada tanque. (Fuente: Vaudolon, Alain. Liquefied Gases. Marine Transportation and Storage. Whitherby Publishers. 2000.)





En el domo de líquido también se encuentran la columna de la bomba de emergencia; la columna para la sonda de nivel de flotador; la línea de llenado de líquido del tanque; las descargas de las bombas principales de descarga; y la descarga de la bomba de reachique/enfriamiento.



Vista de la cubierta “trunk” del LNG/C Madrid Spirit en el Canal de Boyas que da acceso a Puerto Galván en Bahía Blanca (Argentina). (Fuente: Jofre Enseñat)

Los cuatro tanques de carga están interconectados uno con otro por medio de las líneas principales o generales de líquido, vapor y reachique/enfriamiento que se encuentran dispuestas en la cubierta “trunk”. Así mismo también están localizadas en la cubierta “trunk” las líneas principales de suministro de Nitrógeno a los espacios de aislamiento primarios y secundarios, y las de suministro a otros servicios directamente relacionados con el sistema de carga.

También están localizadas en la cubierta “trunk” la línea principal de contraincendios y la línea principal del sistema de rociado con agua de mar para protección de todos los espacios y elementos de cubierta.

#### 4.2.2 Bombas en los tanques de carga

El buque está equipado con bombas eléctricas centrífugas sumergidas de una etapa (las bombas de reachique/enfriamiento son de doble etapa). Están instaladas en el fondo de cada tanque.

Los dos tipos de bombas, bombas de carga y bombas de reachique/enfriamiento, están instaladas como unidades fijas, es decir, dos bombas de carga y una de reachique/enfriamiento en cada tanque.

Además de esto, cada tanque está equipado con un sistema para instalar una bomba de emergencia en caso de que hubiera un fallo total de las bombas de carga. De este tipo de bombas solo existe una a bordo.

#### 4.2.3 Bombas principales de carga

##### Características

<b>Fabricante:</b>	EBARA Internacional Corporation
<b>Modelo:</b>	12EC-24
<b>No. de etapas:</b>	1
<b>Temp. de operación:</b>	-163°C
<b>Capacidad:</b>	1,700 m <sup>3</sup> / h
<b>Altura columna de líquido:</b>	150 m.
<b>Potencia:</b>	448.4 KW (motor: 522.2 KW)
<b>Rendimiento:</b>	80%
<b>Velocidad:</b>	1,780 r.p.m.
<b>Nivel mínimo de líquido:</b>	0.89m. (al arranque)

Cada bomba está preparada para descargar 1,700 m<sup>3</sup>/h con una columna de líquido de 150m. de gas natural licuado. Para conseguir un resultado óptimo en la descarga, está se llevará a cabo con ocho bombas trabajando en paralelo.

Para asegurarnos de que las bombas trabajan de forma adecuada, estrangularemos las válvulas de descarga, con lo que conseguimos una contrapresión en las descargas de las bombas y con ello una mejora en el rendimiento.



A medida que avanza la descarga, los cambios en los ritmos de descarga y en los niveles en los tanques, harán que sea necesario ajustar el porcentaje de apertura de las válvulas de descarga.

En condiciones normales se mantiene el máximo ritmo de descarga hasta alcanzar aproximadamente los 2.3 metros de sonda en cada tanque. En este momento la bomba comienza a cavitarse y a perder succión. Esto se nota por las fluctuaciones que muestran los indicadores de la presión de descarga y los indicadores de amperaje de las bombas. Entonces se procederá a estrangular la válvula de descarga con el fin de que se estabilicen las condiciones y se parará una bomba si es necesario. La bomba que aún esté en funcionamiento se irá estrangulando progresivamente para mantener la aspiración y evitar que la bomba pare debido a la actuación de parada por baja presión, y seguiremos descargando hasta alcanzar un nivel de 0.37 metros de líquido aproximadamente en el tanque de carga.

Para reducir al máximo la cantidad de líquido que queda en los tanques, antes de parar las bombas se apoya el buque aproximadamente un metro. Para finalizar se procede a ajustar el trimado del buque lo más próximo a la situación de aguas iguales para realizar los cálculos finales de la carga remanente a bordo al finalizar la operación de descarga del buque.

Las bombas pueden funcionar en circuito cerrado, recirculando a sus propios tanques abriendo la válvula de llenado de líquido de los tanques de carga y cerrando la “*Throttle*” que es la válvula principal de líquido en cada uno de los tanques. Esta operación se lleva a cabo cuando se detiene la descarga y hay muy poco nivel de líquido en los tanques, así evitamos los problemas que podrían generarse al arrancar la bomba con poco nivel de líquido y poca presión de descarga.

Las bombas de carga pararán de forma automática en cualquiera de los siguientes casos:

- Presión en el tanque de carga igual o menor que la del aislamiento primario más 0.5 KPa (ESD: protección de tanques de carga).
- Presión en la línea general de vapor igual o menor a la presión atmosférica más 0.3 KPa.

- Nivel extremadamente alto en el tanque de carga (99% del volumen).
- Activación del ESD: 10 pulsadores y 12 elementos fusibles.
- Activación del ESD buque/terra: sistema neumático, fibra óptica u eléctrico.
- Pérdida de una fase en el motor.
- Baja corriente en el motor.
- Alta corriente en el motor (sobrecarga).
- Baja presión de descarga en el arranque.
- Parada desde el control de carga del buque.
- Bajo nivel de líquido en el tanque de carga.

La activación del sistema ESD (*Emergency ShutDown*) significa que toda la planta de carga o gas ha sido parada en emergencia además de la/s bomba/s de que se trate.

Se deben de tomar aislamientos a todas las bombas después de salir del puerto de carga para asegurar que todas las bombas se encuentran operativas y para ganar tiempo en caso de tener que instalar la bomba de emergencia en caso necesario.

#### **4.2.4 Bombas de reachique / Enfriamiento**

##### **Características**

<b>Fabricante:</b>	EBARA Internacional Corporation
<b>Modelo:</b>	2EC-092
<b>No. de etapas:</b>	2
<b>Temp. de operación:</b>	-163°C
<b>Capacidad:</b>	50 m³/ h
<b>Altura de columna de líquido:</b>	145 m.
<b>Potencia:</b>	18.0 KW
<b>Rendimiento:</b>	54.4%
<b>Velocidad:</b>	3.560 r.p.m.

En cada tanque hay instalada una bomba de reachique/enfriamiento. Su función principal es el enfriamiento, bien de los tanques, bien de las líneas, y la de alimentar los vaporizadores de metano.

Estas bombas, al igual que las de carga, se arrancan y paran desde el control de carga. En caso de emergencia, por medio de la activación del sistema de parada de emergencia ESD, se detendrán automáticamente todas las bombas.

Las bombas de reachique/enfriamiento se usan en los siguientes casos:

Para enfriar las líneas de líquido antes de la descarga.

Para enfriar los tanques de carga durante el viaje en lastre, antes de la llegada a la terminal de carga (rociando los tanques de carga con gas natural licuado a través de los pulverizadores/rociadores dispuestos en los tanques en los anillos de enfriamiento).

Para bombear LNG desde los tanques al vaporizador forzado o al vaporizador de LNG (en caso de emergencia) cuando se requiere vaporización forzada en las calderas del buque.

Siempre que sea posible, la bomba se arrancará con la suficiente antelación para evitar los posibles problemas que pueden generarse al arrancar con un nivel muy bajo en los tanques. Para ello se suele arrancar con un mínimo de 0.5m. de sonda.

Las bombas se detendrán automáticamente en cualquiera de los siguientes casos:

- Presión en el tanque de carga igual o menor a la del espacio de aislamiento primario más 0.5 KPa.
- Presión en la línea general de vapor igual o inferior a la presión atmosférica más 0.3 KPa.
- Nivel extremadamente alto en el tanque de carga (99% del volumen).
- Activación del sistema de ESD: 10 pulsadores y 12 elementos fusibles.
- Activación del ESD desde tierra a través de la conexión buque/terminal.
- Pérdida de una fase en el motor.
- Baja corriente en el motor.

- Alta corriente en el motor (sobrecarga).
- Baja presión de descarga en el arranque.
- Nivel muy bajo de líquido en el tanque de carga.

El arranque de las bombas en operaciones normales está restringido dependiendo del nivel de líquido en el tanque de carga. No se deben arrancar las bombas cuando el nivel de los tanques de carga sea menor de 300mm.

#### 4.2.5 Bombas de carga de emergencia

##### Características

<b>Fabricante:</b>	EBARA Internacional Corporation
<b>Modelo:</b>	8ECR-12
<b>No. de etapas:</b>	1
<b>Temp. de operación:</b>	-163°C
<b>Capacidad:</b>	550 m <sup>3</sup> / h
<b>Altura columna de líquido:</b>	150 m.
<b>Potencia:</b>	223,8 KW
<b>Rendimiento:</b>	73%
<b>Velocidad:</b>	3,560 r.p.m.
<b>Nivel mínimo de arranque:</b>	0.86 m.

Cada tanque está equipado con una columna o pozo para la bomba de emergencia. Esta columna tiene en su parte inferior una válvula que se mantiene cerrada por medio de un muelle.

En caso de que se produjese un fallo en las dos bombas de carga de uno de los tanques, se procedería a la instalación de la bomba de emergencia. Esta se coloca en su columna, una vez que está ha sido purgada con Nitrógeno. El propio peso de la bomba vence la resistencia que opone el resorte de la válvula situada al pie de la columna quedando ésta en posición abierta. Mientras dura la instalación se mantiene un pequeño flujo de Nitrógeno. Sobre cubierta, junto a cada columna existe una caja de conexión donde se conectan las conducciones eléctricas.

El arranque de las bombas en operaciones normales está restringido dependiendo del nivel de líquido en el tanque de carga. No se deben arrancar las bombas cuando el nivel de los tanques de carga sea menor de 0.86m.



Imagen del punto por el que se debería introducir la bomba de emergencia en la columna correspondiente. (Fuente: Jofre Enseñat)

### **4.3 Operaciones relacionadas con la carga**

#### **4.3.1 Inertado de los espacios de aislamiento**

Los espacios primarios y secundarios de aislamiento están rellenos con Nitrógeno gaseoso seco, cuya presión se mantiene de forma automática dentro de unos valores que oscilan entre 0.2 y 0.6 KPa por encima del valor de la presión atmosférica, dependiendo de si la presión atmosférica o la temperatura aumentan o disminuyen por medio de un sistema de válvulas de alivio o purga, y un sistema de válvulas de alimentación o suministro de Nitrógeno gaseoso.

El Nitrógeno crea una atmósfera seca e inerte en los espacios de aislamiento con los siguientes objetivos:

- Prevención de la formación de una atmósfera inflamable en caso de que se produzca una pérdida o fuga de gas natural licuado.

- Permitir la fácil detección de una pérdida o fuga de gas natural licuado hacia los espacios de aislamiento a través de una grieta en la membrana primaria desde el tanque de carga.
- Prevenir la corrosión de los materiales de construcción de los espacios de aislamiento.

El Nitrógeno producido por dos generadores de Nitrógeno, es almacenado en un tanque presurizado a 10 Bar con una capacidad de 17,6 m<sup>3</sup>, y es suministrado a través de las tuberías generales de alimentación de Nitrógeno a los espacios primario y secundario, por medio de un sistema automático de válvulas de alimentación (que se encuentran localizadas en el local o cuarto de compresores en la cubierta *trunk*). Un exceso de presión de Nitrógeno en los espacios de aislamiento es venteado a través del palo de venteo número dos por medio de un sistema automático de válvulas regulables de alivio o exhaustación.

Los espacios primarios y secundarios de aislamiento de cada tanque están provistos de un par de válvulas de alivio de seguridad, las cuales abren a una presión por encima de la presión atmosférica de 1 KPa, medida o testada en cada uno de los espacios de aislamiento. Estas válvulas de seguridad comunican con los palos para venteo de Nitrógeno dispuestos junto a los palos de venteo principales de cada uno de los tanques de carga.

Los espacios primarios de aislamiento disponen de un *by-pass* manual con una válvula de no retorno y una válvula de bola que comunica con el palo de venteo de Nitrógeno, para poder ventear o barrer un único espacio de aislamiento si fuera necesario.

La planta de producción de Nitrógeno se opera de forma automática. Uno de los generadores de Nitrógeno es capaz de mantener la presión en los espacios de aislamiento en condiciones de demanda de Nitrógeno normales. Cuando se produce una mayor demanda de Nitrógeno, la segunda unidad de producción entrará en funcionamiento de forma automática.

#### **4.3.2 Inertado de los tanques de carga**

El gas inerte con un contenido en Oxígeno menor del 1%, y con un punto de rocío de  $-45^{\circ}\text{C}$ , es producido por la planta de gas inerte del buque a un flujo de unos  $13.800 \text{ Nm}^3/\text{hora}$ . El gas inerte se compone principalmente de Nitrógeno y Dióxido de carbono.

Se deben inertar con Nitrógeno los pozos o tuberías de descarga de la bomba de emergencia antes de inertar los tanques de carga.

Preparar la planta aire seco-gas inerte para su arranque en modo de producción de gas inerte.

Colocar dos carretes que conectan la línea de alimentación de gas inerte con la línea general de líquido de los tanques de carga.

Alinear en cubierta abriendo la entrada a los tanques de carga a través de las válvulas de líquido y salida a través de vapor.

Alinear en el palo de venteo número 1 para poder descargar el aire seco desplazado de los tanques de carga.

La presión de los tanques de carga se puede controlar de modo manual o bien en forma automática ajustando la apertura de la válvula de venteo a proa a un valor de 10 KPa.

Comenzar la producción de gas inerte, cuando el contenido de oxígeno sea menor del 1% y el punto de rocío sea de  $-45^{\circ}\text{C}$ , abrir la válvula en la línea de descarga del generador de gas inerte.

Tomar muestras o lecturas en los domos de vapor de los tanques de carga por medio de los analizadores portátiles de Oxígeno.

Durante la operación de inertado purgar durante al menos 5 minutos el aire contenido en las diferentes líneas utilizando válvulas y tubos de toma de muestras.

Cuando la operación de inertado de tanques de carga, líneas y equipos haya finalizado presurizar los tanques de carga hasta una presión de 15 KPa.

Una vez presurizados los tanques de carga parar el generador de gas inerte y cerrar todas las válvulas que se han utilizado para realizar la operación de inertado.

Retirar los carretes colocados en la descarga de gas inerte utilizados en las operaciones de calentado e inertado.

#### **4.3.3 Puesta en gas de los tanques de carga**

Al terminar la construcción del buque, tras una varada o una inspección de los tanques de carga, estos están llenos de gas inerte o Nitrógeno. Si el purgado de los tanques ha sido hecho con gas inerte, los tanques de carga tienen que ser purgados con gas y posteriormente enfriados al llegar a la terminal de carga. Esto es porque a diferencia de si han sido purgados con Nitrógeno, el gas inerte contiene aproximadamente un 15% de Dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), el cual congelará a unos  $-60^\circ\text{C}$  formando un polvo de color blanco que puede bloquear válvulas, filtros y boquillas/rociadores de los anillos de enfriamiento en los tanques de carga.

Durante la puesta en gas el gas inerte de los tanques de carga es reemplazado por vapor caliente de gas natural licuado. La puesta en gas se realiza para eliminar cualquier gas que pueda congelarse como es el caso del  $\text{SO}_2$  ya comentado y para completar el secado de los tanques de carga.

##### **Descripción**

El gas natural licuado es suministrado desde la terminal al *manifold* de líquido del buque, de aquí se hace pasar este gas natural licuado a la línea de reachique/enfriamiento a través de la válvula ESD de líquido que corresponda en cada caso. Se dirige al vaporizador de gas natural licuado y el vapor de gas natural producido es descargado a  $+20^\circ\text{C}$  a la línea general de vapor de los tanques de carga en cubierta y de aquí a través de cada domo de vapor a los tanques de carga.



Al comienzo de la operación de puesta en gas, el sistema de tuberías y el vaporizador de metano se encuentran bloqueadas con gas o vapor. La línea de reachique puede purgarse a través de las válvulas de enfriamiento/rociado dispuestas en los domos de vapor de los tanques de carga hasta que el gas natural licuado alcance el vaporizador de Metano.

Los vapores de gas natural licuado son más ligeros que el gas inerte, lo que permite que el gas inerte sea desplazado de los tanques de carga a través de las líneas de llenado de líquido a la línea general de llenado de los tanques en cubierta, de aquí el gas inerte es descargado a la atmósfera a través del palo de venteo número 1.

Al detectarse una concentración de Metano del 5% en el palo de venteo numero 1, el gas desplazado de los tanques de carga debe ser enviado a tierra por medio de los compresores de alto rendimiento o a las calderas a través de la línea de gas a la máquina.

Esta operación puede llevarse a cabo sin utilizar los compresores HD dependiendo de la contrapresión existente o con uno o dos compresores en servicio. Si es posible es mejor no utilizar compresores ya que así evitaremos que se formen turbulencias en el interior de los tanques de carga.

La operación de puesta en gas se da por finalizada cuando el contenido de gas Metano medido en la parte alta de los tanques de carga es superior al 80% en volumen.

Así mismo el contenido en los tanques de carga de Nitrógeno y de Dióxido carbónico,  $\text{CO}_2$ , ha de ser menor o igual al 1% (volumen). Estos valores deben de ajustarse a los requerimientos de la terminal.

Esta operación supone renovar la atmósfera en los tanques de carga unas dos veces.

Una vez completado el purgado de los tanques o puesta en gas se procederá a realizar el enfriamiento de los tanques de carga.

Puede que se dé un caso excepcional en el que sea necesario realizar el purgado de uno o más tanques en la mar utilizando gas natural licuado que se encuentre ya en uno de los tanques de carga. En este caso se suministrará el líquido al vaporizador de Metano a través de la línea de reachique utilizando para ello la bomba de reachique/enfriamiento del tanque de carga que contenga el gas natural licuado. Debido a regulaciones de Autoridades locales relativas al venteo de gas Metano a la atmósfera puede que algunas Autoridades portuarias obliguen a que toda la operación se realice enviando los gases exhaustados a las instalaciones de tierra.

#### **4.3.4 Enfriamiento de los tanques de carga**

Después de la operación de puesta en gas todo el sistema de tuberías del buque y los tanques de carga deben ser enfriados antes de que dé comienzo la operación de carga. Para llevar a cabo el enfriamiento se utiliza gas natural licuado suministrado por la terminal.

El ritmo de enfriamiento está limitado por las siguientes razones:

- Evitar excesivos esfuerzos térmicos a la torre que sirve de soporte a las bombas de carga y a todo el equipamiento en los tanques de carga del buque.
- La cantidad de vapor generado debe mantenerse dentro de la capacidad de los compresores HD de forma que sea posible mantener en los tanques de carga una presión de unos 7 KPa (unos 108.5 KPa absolutos).
- Permanecer dentro de la capacidad de producción del sistema automático de generación de Nitrógeno gaseoso para alimentación de los espacios de aislamiento pudiendo mantener las presiones en el primario y secundario dentro de los valores apropiados.

A diferencia con los diseños de tanques de carga rígidos, los gradientes térmicos verticales en las paredes del tanque no suponen una limitación significativa en el ritmo de enfriamiento.

El gas natural licuado es suministrado por la terminal a uno de los *manifolds* de líquido del buque, de aquí pasa a la línea de reachique/enfriamiento y directamente a los anillos de enfriamiento de los tanques de carga a través de las

válvulas de enfriamiento situadas en el domo de vapor. Una vez que el enfriamiento de los tanques de carga está próximo a su finalización enfriaremos el resto de líneas del buque no utilizadas en un primer momento.

Se considera que la operación de enfriamiento ha terminado cuando los sensores de la parte alta del tanque (99%) y el fondo, marcan  $-130^{\circ}\text{C}$ . Cuando se ha alcanzado esta temperatura y en el fondo de los tanques de carga ya hay gas natural licuado puede comenzar la operación de carga a granel de gas natural licuado.

El vapor o gas generado durante el enfriamiento de los tanques de carga es retornado a la terminal por medio de los compresores HD, o si es posible y suficiente por flujo libre a través del *manifold* o conexión de vapor, de la misma manera que cuando se está cargando el buque en una operación normal de carga.

Durante el enfriamiento el flujo de Nitrógeno gaseoso a los espacios primario y secundario de aislamiento se verá incrementado de forma significativa. Es fundamental controlar el ritmo de enfriamiento para permanecer dentro de los límites del sistema de generación de Nitrógeno de forma que la presión en los espacios de aislamiento se mantenga en 0.4 KPa y 0.2 KPa para los primarios y secundarios respectivamente.

Una vez que la operación de enfriamiento ha sido completada y ha comenzado la carga, la temperatura de la membrana de los tanques de carga se encontrará o estará cercana a la temperatura de la carga líquida y llevará varias horas el que se estabilicen los gradientes de enfriamiento en los espacios de aislamiento, hasta alcanzar éstos la temperatura correspondiente a la condición de plena carga en los tanques de gas natural licuado. Consecuentemente durante este periodo de tiempo el *boil off* o vaporización de la carga será mayor de lo normal.

El enfriamiento de los tanques de carga de  $+30^{\circ}\text{C}$  a  $-130^{\circ}\text{C}$  llevará unas 8 horas y para ello se consumirán unos 800 metros cúbicos de gas natural licuado que se vaporizará en los tanques de carga al ser introducido en estos a través de los rociadores dispuestos en los anillos de enfriamiento.

Un ritmo de enfriamiento medio de los tanques de carga de unos 30°C por hora durante las primeras cuatro horas se correspondería con un ritmo medio de enfriamiento del espacio de aislamiento secundario de unos 12°C o 13°C por hora, con lo que tras 8 horas de enfriamiento la temperatura en el espacio secundario de aislamiento será de unos –80°C.

### **Preparativos para realizar la operación de enfriamiento**

Asegurarse de que el sistema de calefacción de los *cofferdams* está en funcionamiento.

Comprobar que el sistema automático de control de presión en los espacios de aislamiento está preparado de forma que sea posible suministrar el Nitrógeno gaseoso adicional necesario para compensar la disminución de presión debida al enfriamiento de los tanques de carga.

Antes de comenzar el enfriamiento debería subirse la presión en el espacio de aislamiento primario hasta un valor de 0.6 KPa.

Asegurarse de que el tanque almacén de Nitrógeno gaseoso se encuentra presurizado a la máxima presión posible.

Asegurarse de que el sistema automático de detección de gases se encuentra funcionando con normalidad.

Preparar los dos generadores de Nitrógeno para su utilización.

Preparar los dos compresores HD para su utilización.

#### **4.3.5 Viaje en lastre**

Una de las principales características de los tanques de carga contruidos de acuerdo al diseño de tanques de membrana de GAZ TRANSPORT es que en tanto en cuanto una cierta cantidad de gas natural líquido permanezca en el fondo de los tanques de carga, la temperatura en la parte alta de los tanques será menor de –50 °C.

Sin embargo si el viaje en lastre es demasiado largo las fracciones más ligeras del gas natural licuado se evaporarán. Incluso puede que la mayor parte de Metano desaparezca y que el líquido remanente en los tanques de carga al final del viaje esté compuesto en su mayor parte por gases licuados del petróleo con una temperatura y densidad alta, lo cual impide su bombeo. De esta forma, el operador del buque debería tener en cuenta este proceso de transformación que sufre la cantidad de remanente dejada a bordo tras la descarga, para ser utilizada durante el enfriamiento de los tanques de carga previo a la llegada al puerto de carga cuando el viaje en lastre es demasiado largo.

Debido a las propiedades de los materiales y al diseño del sistema de contención de la carga con tanques de membrana, el enfriamiento de los tanques previo a la carga es teóricamente no necesario. Sin embargo con objeto de reducir la cantidad de vapor o gas generado y de prevenir cualquier posible *shock* térmico en las estructuras pesadas de los tanques de carga como pueden ser las torres soporte de las bombas de carga, las operaciones de carga se realizan cuando los tanques se encuentran en el llamado “estado frío”.

### **Mantenimiento de la temperatura durante el viaje en lastre**

Se utilizan diferentes métodos para mantener los tanques de carga fríos durante los viajes en lastre.

Tratándose de viajes cortos se retiene en cada uno de los tanques de carga una pequeña cantidad de gas natural licuado al finalizar la descarga. El nivel remanente dejado en los tanques de carga nunca debe ser mayor del 10% de la eslora del tanque; y en cuanto a la cantidad, esta se calculará considerando un 0,15% de *Boil-off* por día. Además habrá que tener en cuenta la posibilidad de enfriar los tanques utilizando el gas natural licuado retenido a bordo, y la necesidad de llegar a la terminal de carga con una sonda mínima en los tanques de carga de 10 cm de líquido en todo el fondo de los tanques con el buque en aguas iguales.

La temperatura que han de tener los tanques de carga a la llegada a la terminal de carga viene dada por la formula siguiente:

ATR (temperatura requerida a la llegada), media de los cuatro sensores de temperatura excepto los dos sensores superiores:

$$ATR \leq -130^{\circ}\text{C}$$

Un enfriamiento adicional será llevado a cabo en la terminal de carga en aquellas ocasiones en las que la temperatura de los tanques de carga sea superior a la ATR.

Existen tres métodos diferentes para realizar el enfriamiento, la elección de uno u otro dependerá de la condición operacional del buque:

- Realizar el enfriamiento de los tanques de carga con gas natural licuado suministrado por la terminal.
- Realizar el enfriamiento de los tanques de carga justo antes de llegar a la terminal de carga. Para lo que es necesario que en el puerto previo de descarga se retenga a bordo una cierta cantidad de gas natural licuado (cantidad conocida como “heel”).
- Mantener los tanques de carga fríos durante el viaje en lastre utilizando los anillos de enfriamiento de una forma periódica, de forma que la temperatura en el interior de los tanques nunca sea superior a  $-130^{\circ}\text{C}$ .

Cualquiera que sea el método utilizado el enfriamiento se lleva a cabo rociando o pulverizando gas natural licuado en el interior de los tanques de carga. Cada uno de los tanques de carga dispone de dos anillos de enfriamiento dotados de rociadores.

**Importante,** La cantidad de gas natural retenido a bordo tendrá que ser calculada teniendo en cuenta un margen suficiente que impida que nos encontremos con el caso de que el remanente a bordo o carga residual sea demasiado pesada o densa para la operación de las bombas de reachique utilizadas en la operación de enfriamiento.

El control de los consumos a bordo es importante, en consecuencia la cooperación de todos los miembros con control sobre el manejo de la planta de gas y la de propulsión es esencial para que todo el gas generado durante las

operaciones de enfriamiento sea utilizado para suministrar la demanda de combustible de las calderas del buque, de esta forma se mantendrá el consumo de fuel reducido al mínimo.

Los compresores de gas LD son utilizados para el suministro de gas a las calderas del buque en el viaje en lastre de la misma forma en que son utilizados en el viaje en carga. El control de los compresores se realiza de acuerdo a la presión de la tubería general de vapor.

Si en el puerto de carga se produce un retraso o demora la cantidad de gas natural licuado remanente irá vaporizándose poco a poco y la cantidad de gas disponible para alimentación de las calderas se verá reducida. De esta forma se debe detener el consumo de gas cuando la presión en los tanques desciende al tiempo que la temperatura en los mismos va aumentando. El grado de calentamiento natural de los tanques depende del factor tiempo, de las condiciones de viaje y de las condiciones atmosféricas.

Después de una reparación o varada del buque habrá que hacer el primer viaje en lastre utilizando únicamente fuel como combustible.

Debido a los diferentes valores caloríficos del fuel y el gas metano el control de combustión en las calderas deberá ser ajustado para evitar sobrecargar las calderas.

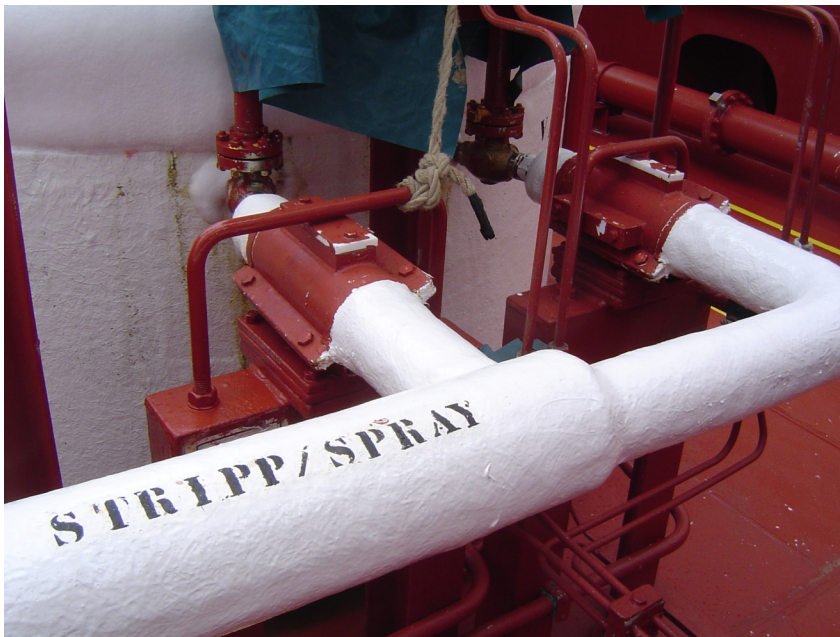


Imagen de los rociadores altos localizados en el domo de vapor de cada uno de los tanques de carga. (Fuente: J. Enseñat)

#### 4.3.6 Operación de carga del buque

##### General

Se supone que todas las comprobaciones y pruebas preparatorias han sido llevadas a cabo de acuerdo a lo indicado en la sección anterior durante el viaje en lastre previo a la llegada a la terminal de carga.

Todas las operaciones relacionadas con la carga del buque se controlan y monitorizan desde el control de carga. La operación de carga de gas natural licuado y la operación simultánea de deslastre se llevan a cabo secuencialmente para satisfacer lo siguiente:

- Que los tanques de carga son llenados a un ritmo uniforme.
- Que la escora y el *trimado* del buque son controlados por medio de los tanques de lastre.
- Que los tanques de carga serán topeados de acuerdo a los límites de llenado dados por las tablas de carga y calibración.
- Durante la operación de topeo el asiento del buque estará limitado a 1 metro apopante, pero si es posible se tratara de que el buque se encuentre en aguas iguales.
- Durante la carga el buque debe mantener el calado dentro del máximo permitido por la terminal cuando se utilice el asiento para favorecer el deslastre de los tanques de lastre.
- Las cargas estructurales, esfuerzos del buque y las condiciones de estabilidad, determinadas por el ordenador de carga, se mantendrán dentro de los límites de seguridad.
- Un Oficial responsable de la operación debe de estar presente en el control de carga durante toda la operación de transferencia de la carga. Es necesario mantener una guardia efectiva en cubierta realizando comprobaciones de rutina y/o para responder a cualquier procedimiento de emergencia que hubiera que llevar a cabo en cubierta durante las operaciones.
- Durante las operaciones de carga se debe mantener comunicación con la terminal, se dispondrá de comunicación telefónica, vía UHF, y vía VHF.



- En todo momento se tendrá conectado y operativo el sistema ESD.

Siempre que el buque se encuentre en servicio con gas natural licuado a bordo, y principalmente durante las operaciones de carga, habrá que cumplir con lo siguiente:

- El sistema de presurización de los espacios de aislamiento debe estar operativo con el sistema de control de presión en automático.
- El sistema secundario de medida de nivel en los tanques de carga debe estar operativo.
- El sistema de registro y de alarmas de temperatura de los espacios de aislamiento y de la estructura del doble casco debe estar continuamente operativo.
- El sistema de detección de gases con su correspondiente sistema de alarmas debe estar operativo.
- Durante las operaciones de carga normalmente el vapor o gas es retornado a la terminal por medio de los compresores HD o utilizando un compresor de tierra. La presión en la tubería general de vapor se mantendrá dentro de los valores deseados ajustando el flujo del compresor.
- Los tanques de carga deben ser mantenidos comunicados por vapor o en la fase gas por medio de la tubería general de vapor en cubierta, con la válvula de vapor en cada uno de los domos de vapor abierta.
- El palo de venteo número 1 se mantendrá listo para su utilización en emergencia durante las operaciones de carga, para realizar un eventual venteo de gas o alivio de presión.

### **Una vez atracados**

- Conectar y hacer firme el cable de toma de tierra.
- Conectar y comprobar el cable de comunicación con la terminal.
- Chequear la comunicación telefónica con la terminal.

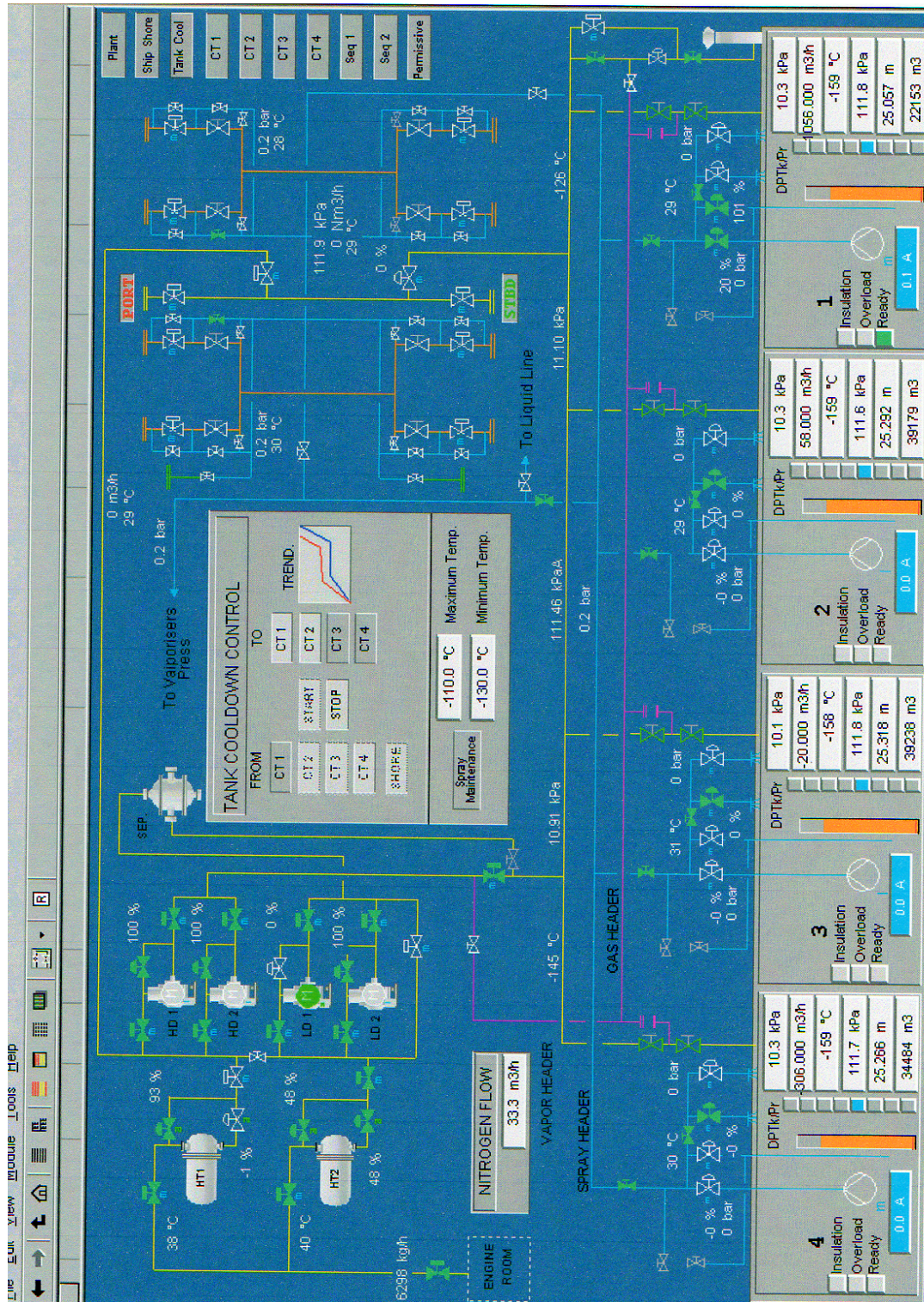
- Comprobar los sistemas de comunicación de reserva con la terminal.
- Cambiar el interruptor de la conexión ESD de la posición “bloqueo” a la posición normal.
- Conectar los brazos de carga, los que sea necesario y el brazo de retorno de gas o vapor.
- En el control de carga conectar las alarmas de nivel que se llevan bloqueadas cuando el buque se encuentra navegando.
- Verificar que los sistemas de alarmas de nivel, el independiente y el dependiente, están operativos.
- Conectar mangueras de Nitrógeno en las conexiones de los brazos o utilizar Nitrógeno suministrado por la terminal.
- Presurizar cada uno de los brazos de carga y comprobar que todas las conexiones son estancas.
- Con el buque en una condición de aguas iguales y adrizado realizar el cálculo de carga a bordo a la llegada.

## **Enfriamiento de las líneas de carga**

- Abriremos parcialmente, de modo que solo despegaremos las válvulas de la línea de llenado de líquido en cada uno de los tanques de carga.
- Abriremos totalmente la válvula de la línea general de líquido en cada uno de los tanques de carga.
- Abriremos las válvulas automáticas ESD correspondientes a cada uno de los brazos de carga conectados.
- Nos aseguraremos de que todas las válvulas de vapor-gas en cada uno de los domos de vapor en los tanques de carga están abiertas así como también la válvula de vapor del *manifold*.
- Solicitaremos a la terminal que comience el bombeo de gas natural licuado a bajo ritmo para enfriar ambos sistemas, líneas de tierra y líneas del buque.



- El tiempo estimado de enfriamiento será de unos 60 minutos, una vez que las líneas del buque están frías comenzar a incrementar el ritmo de carga hasta alcanzar el máximo flujo permitido para el buque.



Pantalla del IAS durante las operaciones de enfriamiento. (Fuente: Jofre Enseñat)

#### **4.3.7 Viaje en carga quemando el *boil-off* en las calderas**

##### **Viaje en carga quemando el gas en las calderas normalmente**

Durante la navegación, cuando los tanques de carga contienen gas natural licuado, el *boil-off* o vaporización natural de la carga generado o producido en los tanques de carga es quemado en las calderas del buque. La operación comienza en cubierta y es controlada por los Oficiales del buque en el control de carga y en el control de la sala de máquinas. Si por cualquier causa el *boil-off* no pudiera ser quemado en las calderas, o si el volumen de vapor o gas producido fuese demasiado grande para poder ser manejado, cualquier exceso de gas o vapor sería venteado a la atmósfera a través del palo de venteo número 1.

##### **Operación**

El gas o vapor generado por la vaporización natural de la carga (*boil-off* gas) entra en la tubería general de vapor a través de los domos o cúpulas de gas de los tanques de carga. Es entonces dirigido hacia la aspiración de uno de los compresores LD, el cual envía el gas a los calentadores de Metano. El gas calentado se envía a las calderas a una temperatura de unos +25°C a través de una válvula de control. La velocidad del/los compresores, así como el ángulo de las palas en la aspiración, están controlados por la demanda de combustible desde las calderas y por la presión en los tanques de carga. El sistema está diseñado para quemar todo el *boil-off* gas producido normalmente cuando el buque se encuentra en una condición de plena carga, y para mantener la presión de los tanques de carga dentro de unos valores determinados dependiendo de la temperatura del gas natural licuado.

Si el consumo de vapor de agua de la planta de propulsión no es suficiente como para quemar todo el *boil-off* necesario o generado, la presión en los tanques de carga irá incrementándose y eventualmente la válvula de alivio de vapor de agua abrirá, enviando vapor de agua sobrecalentado directamente al condensador principal. La válvula principal de alivio de vapor de agua está diseñada para aliviar vapor en forma suficiente que permita a las calderas utilizar todo el *boil-off* producido, incluso cuando el buque se encuentra parado, como puede darse el caso al encontrarse el buque fondeado en espera de atraque en el puerto de carga o a la llegada al puerto de descarga.



El flujo de gas a través de los compresores LD es controlado ajustando la velocidad del compresor y el ángulo de las palas en la aspiración de los compresores. Cuando se comienza a quemar gas en las calderas todo esto es controlado por el control de combustión de las calderas. Hay que seleccionar dentro del control de combustión de las calderas el *boil-off* normal, estimado o deseado; así como las presiones máxima y mínima deseada en los tanques de carga y la presión a la que se desea entre en operación la válvula principal de alivio de presión de vapor de agua.

En condiciones normales de operación la válvula normal de gas se selecciona en un valor del 60% (el gas proporciona el 60% del combustible necesario para producir el 90 % de la capacidad total de producción de vapor en las calderas), las presiones máxima y mínima de los tanques de carga se fijan en 105 y 110 KPa absolutos.

Si la válvula normal de gas se ha ajustado correctamente, la presión en los tanques de carga permanecerá dentro de los valores seleccionados. En el caso de que se haya seleccionado la válvula a un valor demasiado grande la presión en los tanques de carga irá reduciéndose lentamente hasta que alcance el valor mínimo seleccionado. Si la presión en los tanques continua reduciéndose por debajo del valor mínimo seleccionado, la apertura de la válvula normal de gas irá reduciéndose hasta que la presión en los tanques de carga se incremente hasta alcanzar un valor superior al mínimo seleccionado.

Si la válvula normal de gas se ha ajustado en un valor demasiado pequeño la presión en los tanques de carga irá incrementándose lentamente hasta que alcance el valor máximo seleccionado. En caso de que la presión en los tanques continúe incrementándose por encima del valor máximo seleccionado la válvula normal de gas irá aumentando su apertura hasta que la presión en los tanques de carga se reduzca a un valor por debajo del máximo seleccionado.

En caso de que la presión en los tanques de carga continúe incrementándose porque el consumo de vapor no es suficiente para quemar todo el *boil-off* necesario, la “*steam dump*”, válvula de alivio de vapor al condensador principal, abrirá automáticamente.

La “*steam dump*” está diseñada para abrir cuando la válvula normal de vapor abre en automático y alcanza un valor de apertura un 5% superior al seleccionado, y cuando la presión en los tanques de carga alcanza la presión preseleccionada para la entrada en operación de la válvula de alivio de vapor de agua.

El sistema de tuberías de carga está diseñado de forma que un *boil-off* excesivo pueda ser venteado en caso de producirse cualquier parada en el sistema de quemado de gas en las calderas del buque. El control de la válvula automática de venteo a la atmósfera a través del palo de venteo número 1 está ajustado a un valor de 22,5 KPa.

En el caso de que la presión en la tubería general de vapor descienda a un valor menor de 2 KPa por encima de la presión en los espacios primarios de aislamiento sonará una alarma.

En caso de que se produzca una parada automática o manual del sistema de combustión (o si la presión en los tanques de carga desciende a un valor de 0.5 KPa por encima de la presión en los espacios de aislamiento), la válvula master de gas a las calderas cerrará y la línea de suministro de gas a la máquina deberá ser purgada con Nitrógeno.

### **Viaje en carga quemando en las calderas *boil-off* forzado**

Se deben de tener en cuenta consideraciones de tipo económico respecto a la ventaja de quemar gas en las calderas en lugar de fuel antes de llevar a cabo la operación de quemar gas de una manera forzada.

Si durante un viaje en condición de carga es necesario suministrar gas adicional para alimentar las calderas del buque, esto es posible forzando la vaporización de Metano líquido utilizando para ello el equipo dispuesto a bordo.

La operación de la que estamos hablando, conocida como *boil-off* forzado, o mejor vaporización forzada, se utilizará para suplementar el suministro de gas a las calderas de forma que el gas alcance para suministrar el 100% del combustible necesario.

## Operación

Toda la disposición de líneas, válvulas y equipos necesarios para una operación normal de consumo de gas en las calderas se mantiene y lo que se hace es poner en funcionamiento el vaporizador forzado de LNG.

Una única bomba de reachique/enfriamiento es utilizada para bombear gas natural líquido hasta el vaporizador forzado. El exceso de flujo es retornado al tanque de carga a través de la línea de reachique del tanque de carga de que se trate en particular. El sistema puede funcionar en automático estableciendo el control de la válvula de recirculación dependiendo de una determinada presión que se quiera mantener en la línea general o principal de reachique/enfriamiento.



Imagen de la descarga y recirculación de la Stripping. (Fuente: Jofre Enseñat)

Después de la vaporización del gas natural licuado líquido, el gas Metano producido pasa a través del separador de gotas (*Demister*) donde se elimina la

posibilidad de que el flujo de gas transporte algo de gas natural líquido. El vapor o gas se combina o mezcla con el gas o vapor procedente de la vaporización natural del metano líquido en los tanques de carga y es aspirado por los compresores LD.

Se utiliza un único compresor LD en esta operación.



(a) Forcing Vaporizer  
(Fuente: Jofre Enseñat)



(b) Demister



(c) Heater

El flujo de gas a través del compresor es controlado por el control de combustión de las calderas ajustando la inclinación/ángulo de las palas o aletas en la aspiración del compresor, así como ajustando su velocidad de giro al mismo tiempo. El control del compresor se lleva a cabo en la siguiente forma:

- En condición de poca carga: se controla o varía por medio del ángulo/inclinación de las palas de aspiración ( $-30^{\circ}$  a  $80^{\circ}$ ).
- En condición de carga: se controla o varía ajustando la velocidad del compresor (30-60 Hz).

El control de combustión ha de ser ajustado en el modo FBO (*boil-off* forzado).

La cantidad de *boil-off* forzado que es necesario producir viene controlada por las variaciones en la apertura de la válvula de alimentación al vaporizador forzado dirigida por el control de combustión de las calderas.

Cuando se cambia a un consumo de gas del 100%, el flujo de fuel oil se ajusta a un valor mínimo. El suministro de fuel oil a los mecheros se interrumpe y el sistema de alimentación de fuel oil se pone en recirculación. Los lazos del control de combustión de fuel oil se mantienen energizados de forma que en caso de que se produzca una emergencia los mecheros de fuel entren en funcionamiento.



En el supuesto de que se produzca una parada automática o manual del sistema de quemado de gas, o en el caso de que la presión en los tanques de carga descienda a un valor de 0.1 KPa por encima del valor de presión en los espacios de aislamiento, la válvula master de gas cerrará automáticamente y la línea de suministro de gas a la cámara de máquinas será purgada con Nitrógeno. Bombas reforzadoras de presión de fuel están incorporadas en el sistema o lazo de control de forma que se produzca un cambio rápido de combustible en el caso de que el proceso de quemar gas sea interrumpido.

#### **4.3.8 Descarga del buque con gas retornado de tierra**

En el transcurso de una operación de descarga normal sólo se utilizarán las bombas principales de carga, y una cierta cantidad de carga líquida se retendrá a bordo para el mantenimiento en estado frío de los tanques de carga.

La cantidad de carga líquida retenida a bordo dependerá de la duración del viaje en lastre y recibe la denominación anglosajona de “HEEL”.

Si el buque tuviese que calentar los tanques de carga por razones técnicas, se utilizarán las bombas de reachique para descargar la carga remanente a bordo una vez se ha completado la descarga a granel utilizando las bombas principales de carga.

Durante la descarga, de tierra se suministra al buque vapor o gas natural licuado en estado gaseoso para de esta forma mantener los valores de presión en los tanques de carga dentro de unos ciertos valores operacionales.

### **General**

Las bombas principales de carga descargan el gas natural licuado a la tubería general de líquido del buque, y de aquí es enviado a tierra a través de las tuberías transversales de líquido (*Crossover*) y de las conexiones en los *manifolds* de líquido.

Tras un incremento inicial en la presión de los tanques de carga la presión en los mismos disminuye, es entonces cuando se hace necesario suministrar vapores de Metano desde tierra a través del *manifold* de vapor, de la tubería transversal de

vapor y de la línea general de vapor a los domos de vapor de los tanques de carga para mantener una presión en los tanques de 110 KPa absolutos.

En el caso de que el gas retornado de tierra no fuera suficiente para mantener la presión en los tanques de carga, habría que utilizar otros medios de suministro de vapor a los tanques, como pueden ser:

- Utilizar los anillos de enfriamiento de los tanques pulverizando de esta forma gas natural licuado.
- Utilizar el vaporizador de gas natural licuado situado en el cuarto de compresores.



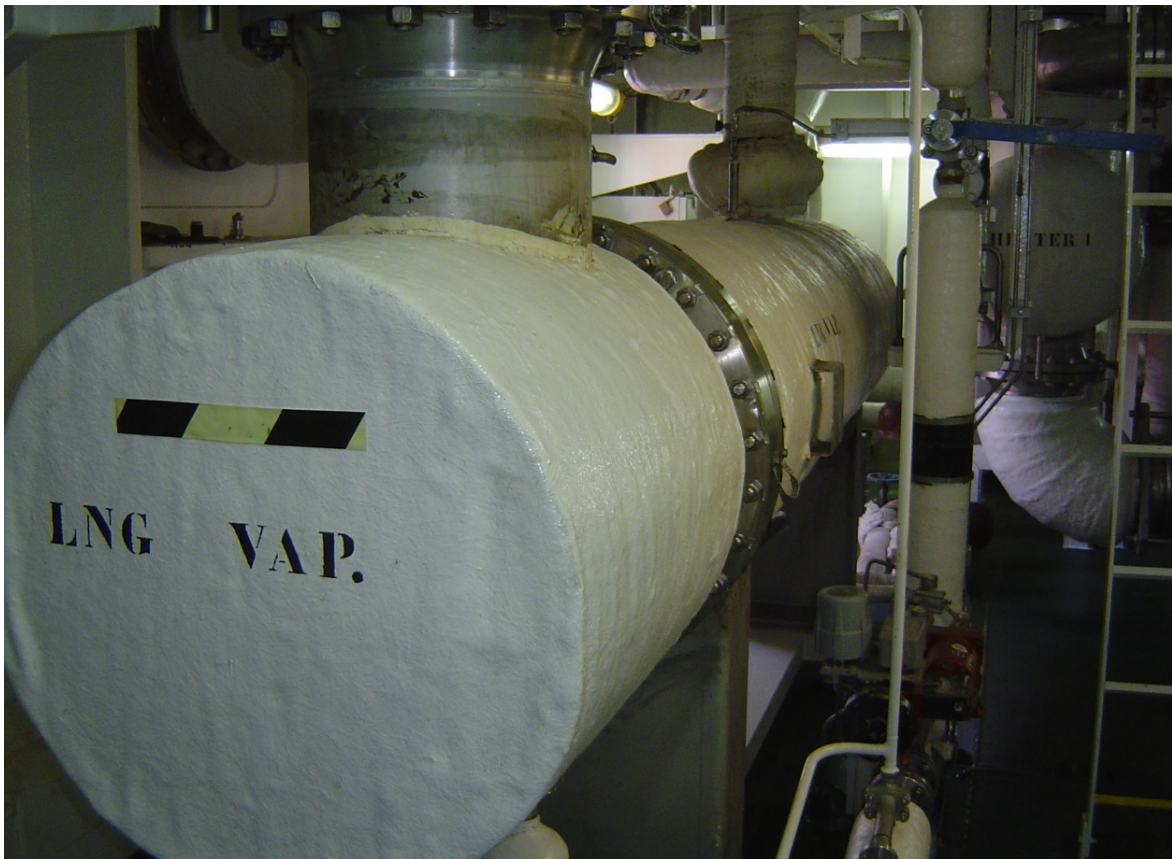
Líneas Crossover que cruzan la cubierta trunk. (Fuente: Jofre Enseñat)

Se debería preparar y alinear el calentador de Metano de forma que estuviese listo para evitar ventear vapores de gas natural licuado fríos a través del palo de venteo número 1.



La operación de lastrado del buque se lleva a cabo al tiempo que la operación de descarga. La operación de lastrado se programa de forma que se mantenga el buque dentro de los límites requeridos referentes a limitación de calado, asiento, esfuerzos y estabilidad. Toda esta información es obtenida en automático del ordenador de carga del buque.

Imagen del brazo de vapor del manifold de estribor.  
(Fuente: Jofre Enseñat)



LNG Vaporizer en primer plano con el Heater al fondo. (Fuente: Jofre Enseñat)





Ordenador de carga del buque situado en el control de carga. (Fuente: Jofre Enseñat)

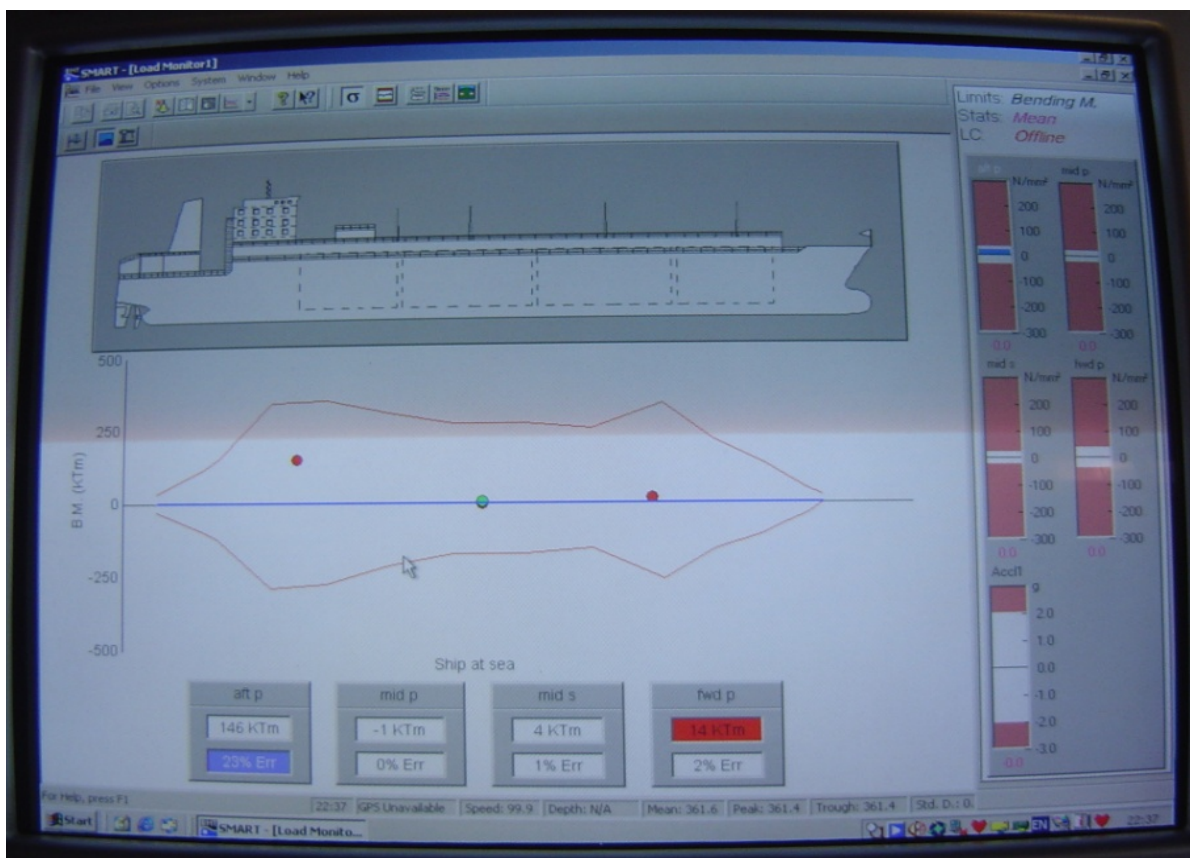
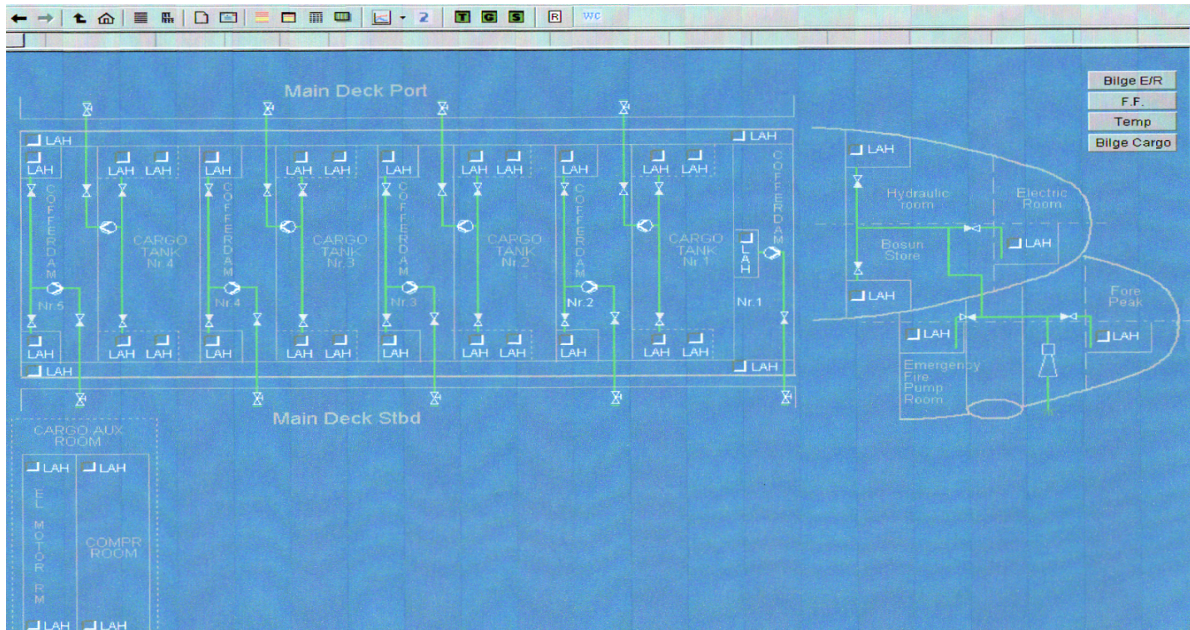


Imagen del ordenador de esfuerzos situado en el puente de navegación. (Fuente: Jofre Enseñat)

Durante la descarga se mantiene el buque prácticamente en condición de aguas iguales. Si fuera necesario vaciar un tanque de carga completamente habría que trimar el buque a popa de acuerdo al máximo calado permitido en el atraque para de esta forma ayudar al reachique del tanque.



Esquema IAS de los pocetes de los tanques de carga y cubierta. (Fuente: IAS del buque LNG/C Madrid Spirit)

Cada uno de los tanques es descargado normalmente hasta un nivel de aproximadamente 0.37m. La cantidad de líquido retenida en los tanques varía dependiendo de la duración del viaje en lastre, del tiempo estimado de espera antes de la próxima carga y de la cantidad de *boil-off* (vapor de la carga) que se estime quemar en las calderas del buque.

Cuando se están descargando los tanques operando las dos bombas principales de carga de cada uno de los tanques, la primera bomba se para a un nivel de líquido en el tanque de aproximadamente 1m. para evitar de esta manera la formación de excesivas turbulencias en el fondo del tanque de carga que originarían problemas de vacío en la succión o aspiración de las bombas.

Si el buque tiene que calentar uno o más tanques de carga por razones técnicas, habrá que *trimarlo* de acuerdo al calado máximo permitido por la terminal ya que las bombas están dispuestas en la parte de popa de los tanques de carga. La carga remanente en los tanques será descargada a tierra o a otros tanques

utilizando la bomba de reachique al completar la descarga utilizando las bombas principales.

La bomba de reachique se utiliza y se tiene en funcionamiento al mismo tiempo que la bomba de carga principal remanente del tanque de que se trate en particular hasta que la bomba principal pare debido a la protección de baja presión de descarga dispuesta a tal efecto.

Una vez completada la descarga, los brazos de carga y todo el sistema de tuberías utilizado en la operación, es purgado y drenado al tanque de carga número 4, es entonces cuando se comprueba que los brazos de carga están libres de gas y son desconectados.

Debido a la configuración o disposición de los *manifolds* es necesario purgar las líneas de carga utilizando Nitrógeno gaseoso a una presión de al menos 300 KPa. Hay que repetir la operación varias veces hasta conseguir un drenaje exitoso de los *manifolds* de conexión con los brazos de carga de tierra.

El brazo de retorno de vapor se mantiene conectado hasta justo antes de la hora de salida del buque si se espera que la maniobra de salida del buque se demore.

## **Preparación para la operación de descarga**

Se supone que todas las válvulas están cerradas antes de comenzar.

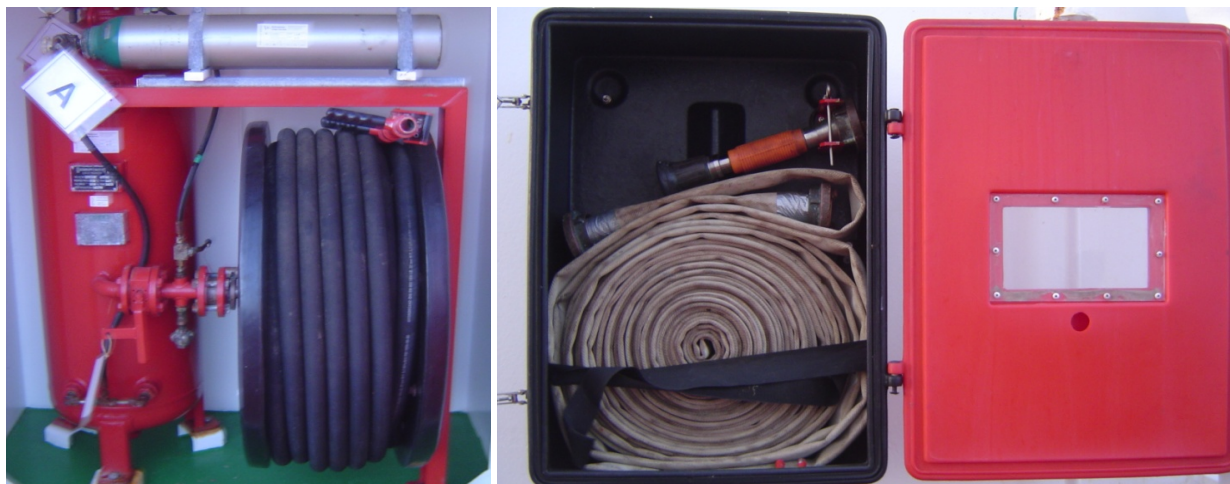
Preparación preliminar:

- Realizar comprobaciones necesarias antes de comenzar cualquier operación relacionada con la carga.
- Comprobar la operación remota de todas las válvulas relacionadas así como de las válvulas ESD.
- Comprobar la operación remota de las válvulas de lastre.
- Comprobar la operatividad del sistema de parada de emergencia ESD.



### Precauciones de seguridad:

- Asegurarse de que el sistema de rociadores en cubierta y la cortina en el costado del buque están operativos.
- Preparar todo el equipo contra incendios, mangueras de agua y trajes de protección para su posible utilización.



Estación de Polvo Seco situada en la Cubierta Trunk y manguera estibada en la cubierta Trunk.  
(Fuente: Jofre Enseñat)



Imagen interior y exterior del armario donde se estiban los trajes de bombero. (Fuente: Jofre Enseñat)



### Alarmas de nivel de los tanques de carga:

- Conectar las alarmas de alto nivel de los tanques de carga.
- Asegurarse de que las válvulas de vapor en los domos o cúpulas de vapor de los tanques de carga están abiertas. Estas válvulas deben estar fijas en posición abierta en todo momento que el buque se encuentre en condición de carga a bordo, a menos que un tanque haya sido aislado y puesto en aire por cualquier causa.
- Asegurarse de que las válvulas en la línea general de vapor en cubierta están abiertas.
- Bombas de carga, comprobar los aislamientos de todas las bombas de carga y sus conexiones antes de proporcionarles corriente y carga.
- Comprobar las conexiones de los brazos de líquido y vapor que van a ser utilizados.
- Comprobar los sistemas de comunicación con la terminal de tierra.
- Comprobar la conexión o enlace buque/tierra.
- Cuando de la terminal de tierra estén listos, purgar con Nitrógeno suministrado de tierra las conexiones de líquido y vapor.
- Abrir las válvulas ESD del *manifold* que vaya a ser utilizado.
- Comprobar el funcionamiento del sistema de parada de emergencia ESD actuando el sistema desde tierra y desde el buque. Volver a abrir las válvulas ESD de los *manifolds* de líquido y vapor.
- Una vez puestos de acuerdo con la terminal de tierra puede dar comienzo el enfriamiento.

## Enfriamiento de líneas y brazos antes de comenzar la operación de descarga

Para realizar el enfriamiento de las líneas del buque proceder de la siguiente forma, suponemos que se va utilizar la bomba de reachique del tanque número 3, y que todas las líneas en los *manifolds* y las válvulas ESD están abiertas después de haber sido purgadas con Nitrógeno.

Arrancar la bomba de reachique del tanque número 3.

A través de las válvulas de conexión de la línea general de reachique del buque con los *manifolds* de líquido enfriar los brazos y las líneas de tierra. Una vez que se han enfriado las líneas de tierra hasta una temperatura de  $-100^{\circ}\text{C}$  abriremos las válvulas manuales de los *manifolds* de líquido del buque y comunicaremos las líneas generales de líquido y de reachique abriendo las válvulas dispuestas a tal efecto junto al cuarto de compresores, procediendo de esta forma con el enfriamiento de las líneas del buque.



Imagen de las cinco válvulas manuales del manifold de babor y línea de Stripping que comunica con uno de los brazos de líquido del Manifold. (Fuente: Jofre Enseñat)

El enfriamiento se considera finalizado cuando los *manifolds* del buque y la línea general de líquido alcancen una temperatura de aproximadamente  $-130^{\circ}\text{C}$ .



Punto y válvula de conexión entre la línea de reachique y la línea general de líquido.  
(Fuente: Jofre Enseñat)

Parar la bomba de reachique del tanque número 3 y cerrar todas las válvulas utilizadas con excepción de las válvulas manuales y las válvulas ESD de cada uno de los *manifolds* de líquido que vayan a ser utilizados.

Una vez terminado el enfriamiento de ambos sistemas y cuando de la terminal avisen que están preparados para comenzar la descarga procederemos a dar comienzo a la misma.

### **Operación de descarga**

Antes de arrancar las bombas principales de carga en los tanques números 2 y 3 (en este caso, estos serán los primeros tanques con los que se comenzara la descarga) es necesario llenar las columnas de descarga de las bombas con gas natural licuado para evitar un golpe de presión en las líneas. Se comenzará con el tanque de carga número 3.

Para ello arrancaremos la bomba de reachique del tanque de que se trate, y con la válvula de la bomba principal de carga abierta entre un 25% y un 30%, rellenaremos la columna de descarga con la descarga de la bomba de reachique.

Una vez llena la descarga de la bomba principal de carga el buque está listo para comenzar la descarga.

Notificar al control de la máquina que se van a comenzar a arrancar las bombas principales de carga.

Abrir la válvula de llenado de líquido del tanque de que se trate, se utilizará esta válvula para recircular al tanque la descarga de la bomba principal de carga una vez arrancada hasta que dependiendo de la demanda de tierra se ponga en línea la descarga de la bomba principal de carga.

Arrancar la bomba principal de carga.

Comprobar las líneas que se están utilizando asegurándose de que no existe ninguna pérdida. Abrir completamente la válvula de descarga de la bomba de que se trate.



Cuando de tierra estén listos para recibir carga comenzar a cerrar la recirculación al tiempo que se abre la válvula general o “*throttle*” del domo de líquido del tanque de que se trate.



Throttle del tanque nº4. (Fuente: Jofre Enseñat)

Una posible secuencia para el arranque de las bombas de carga en condiciones normales de descarga para conseguir una operación estable de descarga es la siguiente:

Tanque núm. 3, tanque núm. 2, tanque núm. 4, tanque núm. 1.

Controlar la presión en los tanques de carga.

Solicitar retorno de vapor de tierra y continuar controlando la presión en los tanques hasta confirmar que esta se encuentra estabilizada.

Al tiempo que se aumentan la presión y el flujo de descarga continuar chequeando todo el sistema de tuberías utilizado así como los brazos de carga para detectar cualquier posible pérdida.

Ajustar las válvulas de descarga de las bombas principales de carga para obtener un funcionamiento óptimo de las mismas indicado por el amperaje, presión de descarga y gráfico de operación de la bomba.

Es importante mantener la presión de los tanques de carga en un valor de al menos 10 KPa relativos para de esta forma evitar cavitaciones y tener una buena presión de aspiración. Si la presión de los tanques de carga descendiera a un valor de 6 KPa relativos habría que demandar un incremento en la cantidad de gas retornado de tierra.

En el caso de que la terminal no pudiera suministrar más o por más tiempo gas de retorno, habría que arrancar el vaporizador de metano para elevar la presión de los tanques de carga.

Comenzar la operación de lastrado del buque. Mantener los calados, asiento y esfuerzos dentro de los límites permisibles por medio del control de los niveles de los diferentes tanques de lastre. Utilizar como referencia los datos suministrados a la entrega del buque referentes a la estabilidad.

Continuar controlando la presión en los tanques de carga así como los amperajes y presiones de descarga de las bombas principales de carga.

Estrangular cada una de las válvulas de descarga de las bombas lo necesario para impedir que caigan debido a la protección de baja intensidad a medida que el nivel de líquido disminuye en los tanques de carga.

Parar las bombas de carga en cada uno de los tanques de carga cuando los niveles en los tanques sean de 1.1m. en el tanque 4 y de 0.3m. en los tanques 1, 2, y 3 (en el caso de seguir la secuencia anterior).

Estrangular las válvulas de descarga de las bombas dejando una apertura de un 40% aproximadamente antes de parar las bombas. Si se están utilizando dos bombas en un tanque cuando el nivel sea de 0.80m. estrangular la descarga de

una de las bombas al 40% y pararla. Esto es para evitar la formación de turbulencias en las aspiraciones de las bombas.

Al finalizar la descarga una vez paradas todas las bombas:

- Drenar la línea general de líquido.
- Cerrar el retorno de gas enviado desde tierra

En caso de que sea necesario reachicar los tanques utilizar la conexión dispuesta en el *manifold* de proa que une la línea general de reachique/enfriamiento con la línea general de líquido.

### **Purgado y drenado de los brazos de carga**

Cuando la terminal de tierra este preparada para inyectar Nitrógeno y la presión en el *manifold* sea de 250 KPa:

- Cerrar las válvulas ESD de los *manifolds* de líquido utilizados.
- El purgado de brazos se realiza de uno en uno.
- Abrir las válvulas de bypass en los *manifolds*.



Válvulas de by-pass de uno de los brazos de líquido del manifold de babor. (Fuente: Jofre Enseñat)



- Cerrar las válvulas de bypass cuando la presión en el *manifold* desciende hasta cero.

- Repetir la operación una segunda vez. La ultima vez cerrar la válvula de bypass cuando la presión sea de 100 KPa para eliminar de esta forma el riesgo de que retorne líquido procedente de las líneas del buque.

- Repetir los pasos anteriores, con cada uno de los brazos de carga.

- Abrir la válvula de drenaje en el brazo de carga para asegurarse de que no existe líquido remanente. Cuando la lectura de Metano tomada con un analizador portátil sea menor del 1%, cerrar las válvulas ESD del brazo de carga.

Cuando se ha completado el purgado de los brazos se puede proceder a la desconexión de los mismos. Terminar la operación de lastrado del buque para poder realizar los cálculos de liquidación de la carga, una vez completados dejar el buque en condición de salida a la mar.



Imagen de uno de los brazos de líquido con la válvula de drenado en la parte inferior derecha de la fotografía, y válvula ESD de uno de los brazos de vapor del manifold. (Foto: Jofre Enseñat)

Justo antes del comienzo de la maniobra de salida proceder a desconectar el brazo de retorno de vapor. Para realizarlo, previamente debemos purgar la línea de vapor con Nitrógeno suministrado por tierra presurizando el brazo hasta alcanzar una presión de 200 KPa. Confirmar que el tanto por ciento de Metano en la válvula de drenaje es menor del 1%.

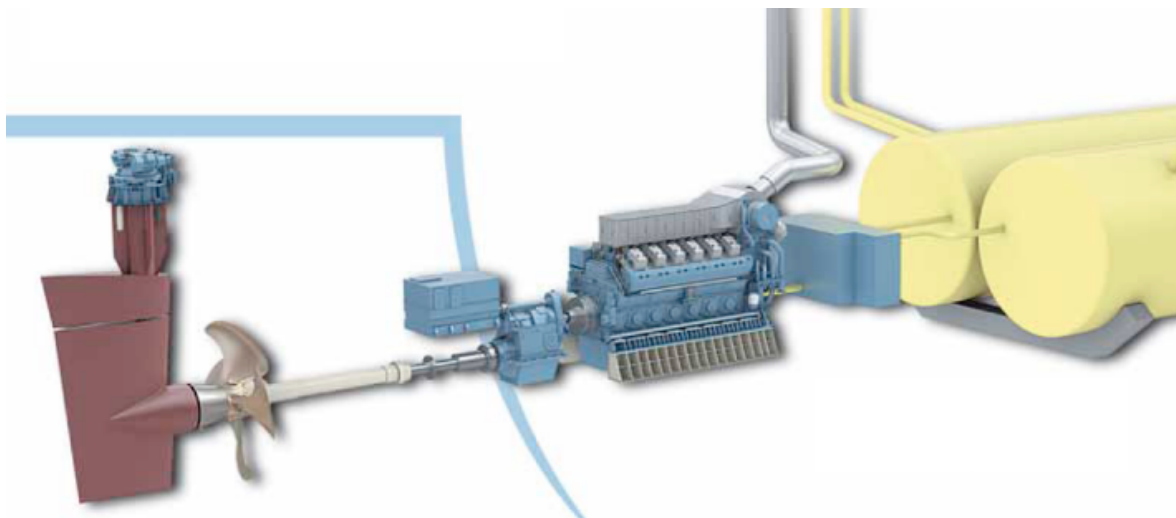


Imagen del analizador portátil que utilizaremos previamente a la desconexión para asegurarnos que la concentración de metano sea inferior a la necesaria. (Fuente: Jofre Enseñat)

- Desconectar el brazo de retorno de vapor.
- Preparar el sistema de carga para quemar gas en la mar.

## CAPÍTULO 5

### **Presencia del gas natural como combustible propulsivo para motores auxiliares en puerto y como alternativa a los derivados del petróleo**



Esquema de instalación de un motor dual.

(Fuente: Rolls-Royce Offshore. Diesel & Gas Engines. [www.Rolls-Royce.com](http://www.Rolls-Royce.com))



## **5.1 Introducción**

En los últimos 40 años, las turbinas de vapor han dominado la propulsión y la generación de electricidad a bordo de los buques gaseros. La facilidad de esas instalaciones para utilizar los vapores de la carga, y su aparente fiabilidad, las han mantenido en una posición que desde hace mucho han ocupado los motores diesel en otros segmentos de la industria naval. Pero las turbinas de vapor no son muy eficientes y eso ha tenido un impacto negativo tanto en la economía operativa de los buques como en sus emisiones de gases.

Animados en principio por las recientes innovaciones en su tecnología de motores de gas, diferentes empresas constructoras como Wärtsilä empezaron a buscar soluciones más económicas y ecológicas para la propulsión de los buques gaseros.

Se estudiaron alternativas con motores diesel de 2 y 4 tiempos, otras con motores capaces de quemar gas a alta presión y asimismo con motores capaces de quemar tanto gas a baja presión como gasóleos, y se analizaron tanto instalaciones con propulsión mecánica convencional como plantas con propulsión eléctrica, con y sin plantas de re-liquefacción de los vapores de la carga ("boil-off").

Entre todas ellas se vio que la alternativa más atractiva a las turbinas de vapor era la propulsión eléctrica con motores capaces de quemar tanto gas a baja presión como gasóleos (los denominados 'motores duales').

La creciente demanda de transporte de gas natural licuado en todo el mundo no solamente ha impulsado la demanda de buques para este tipo de tráfico sino que ha abierto nuevos horizontes en cuanto al tamaño de los propios buques y de sus tanques. Paralelamente, el estudio de las cargas dinámicas para estas nuevas dimensiones ha dado lugar a importantes avances en el diseño y construcción de los sistemas de contención, así como en los elementos propulsivos.

En conjunto, toda la tecnología de almacenamiento y transporte de LNG, está sometida a una constante investigación, cuyos frutos observamos casi a diario.

Los motores duales pueden funcionar alternativamente alimentados por gas natural de baja presión o por combustible diesel o fuel-oil y son capaces de cambiar automáticamente de una forma a la otra, si se interrumpiera la fuente de gas, manteniendo en todo momento la potencia producida.

Tradicionalmente la planta de turbina de vapor era la usada por los buques LNG, pero la nueva planta de Motores Diesel Duales con Motores Eléctricos es más compacta, lo que permite mayor carga, para un mismo tamaño de casco, aumentando las ganancias anuales.

Este tipo de planta con varios motores instalados también ofrece ventajas en términos de eficacia de combustible y consecuencias para el medio ambiente, dando seguridad y flexibilidad, pudiendo elegir el número óptimo de motores que funcionan para satisfacer la velocidad de servicio requerida.

La demanda mundial de energía crece rápidamente, y el gas natural licuado se perfila como uno de los vectores energéticos más importantes. Precios al alza y costes a la baja, tanto en la producción como en el transporte, están produciendo un auténtico *boom*. Sin embargo, la rápida conversión de la tecnología existente para adaptarla a este complicado producto no es fácil ni está exenta de riesgos.

Competencia profesional y experiencia práctica a partir de una amplia gama de campos de actuación en la ingeniería son necesarias para garantizar una transición segura.

Todo este *background* de conocimiento adquirido mediante la investigación en el sector del transporte marítimo creemos que debe poder ser trasladado a las instalaciones portuarias para que estas puedan abastecer de gas natural a los buques en puerto para que estos puedan utilizar esta fuente de energía para poder mantener sus requerimientos energéticos sin necesidad de mantener en funcionamiento sus generadores quemando gas-oil o fuel.



## 5.2 Antecedentes históricos. Primeros modelos

### 5.2.1 Antes del año 2000

Buques equipados con sistemas propulsivos basados en Gas Natural Comprimido (CNG) en Rusia, Holanda, Estados Unidos, Canadá y Australia.



Buque propulsado por CNG. (Fuente: American Bureau of Shipping)

Maquinaria de gas para instalaciones marítimas *offshore*. Especialmente unidades flotantes de producción, almacenamiento y descarga (FPSOs).



FPSO equipada con máquina a gas. (Fuente: [www.offshore-technology.com](http://www.offshore-technology.com))

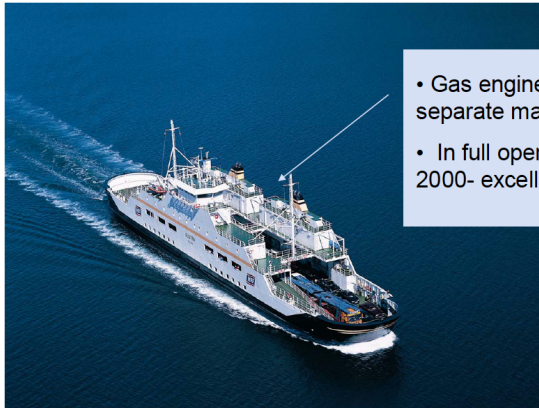


## Buques que transportan LNG y LPG:



Imagen de un buque metanero. (Fuente: DNV: 2008. Gas Engine Propulsion in Ships. Copenhagen.)

## Ferry Gultra de transporte de coches y pasajeros:



- Gas engines located in 4 separate machinery spaces
- In full operation since January 2000- excellent performance

Imagen aérea del ferry Gultra. (Fuente: DNV: 2008. Gas Engine Propulsion in Ships. Copenhagen.)

### 5.2.2 A partir del año 2000

Los dos buques *supply* PSV *Viking Energy* y PSV *Stril Pioneer* fueron los primeros buques equipados con sistema propulsivo dual basado en el LNG en el año 2003.



PSV Viking Energy. (Fuente: DNV: 2008. Gas Engine Propulsion in Ships. Copenhagen.)



PSV Stril Pioneer. (Fuente: DNV: 2008. Gas Engine Propulsion in Ships. Copenhagen.)

Entre enero y febrero de 2007, se construyeron cinco *ferries* de coches y pasaje equipados con máquinas que funcionan únicamente con gas.

El buques *supply Viking Queen* y *Viking Lady* equipados con máquinas duales se entregaron en Febrero de 2008.



Buques Viking Lady y Viking Queen. (Fuente: [www.shipsand oil.com](http://www.shipsand oil.com))

Buques entregados a la Coast Guard Noruega equipados con máquinas duales a gas y diesel. El primero de los tres buques contratados se entregó en 2008.



Imagen del Buque Kystvakt entregado a la Coast Guard.  
(Fuente: DNV: 2008. Gas Engine Propulsion in Ships. Copenhagen.)

En junio de 2004 fue entregado el LNG de pequeñas dimensiones Pioneer Knutsen con motores duales a gas y diesel.



Imagen del LNG/C Pioneer Knutsen. (Fuente: [www.knutsenoas.com](http://www.knutsenoas.com))



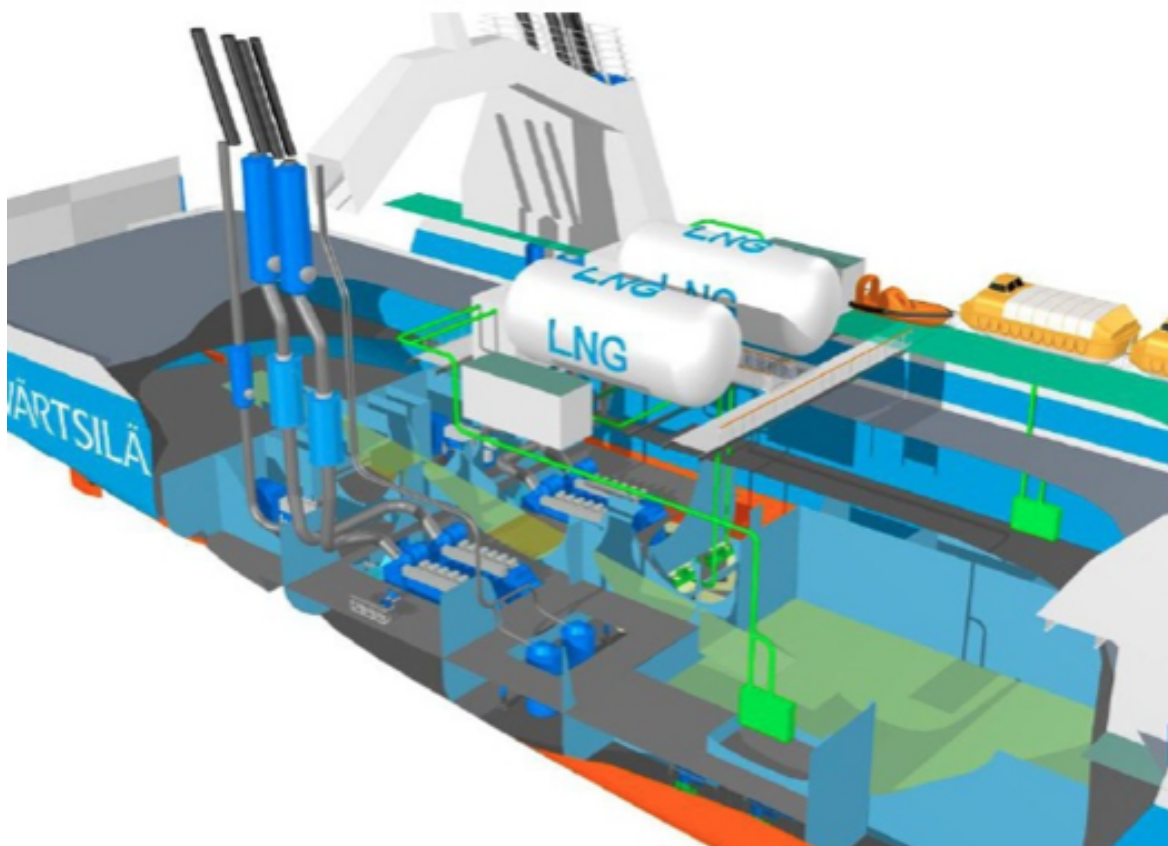
A partir de enero de 2008 se han encargado numerosos LNG/C con motores duales de construcción coreana.



Imagen del un LNG/C de construcción coreana.

(Fuente: DNV: 2008. Gas Engine Propulsion in Ships. Copenhagen.)

Wärtsilä ha desarrollado un concepto de buque eléctrico donde la generación de energía se produce con LNG. Como consecuencia de esta transformación se reduce un 4% el consumo de fuel al no precisar precalentamiento. Las emisiones de gases de efecto invernadero se reducen en un 25% y las de óxidos de azufre desaparecen.



Representación del buque eléctrico de Wärtsilä.

(Fuente: DNV: 2008. Gas Engine Propulsion in Ships. Copenhagen.)

Det Norske Veritas (DNV) ha introducido un nuevo modelo de portacontenedores llamado Quantum que combina la tecnología más avanzada con los mayores requerimientos comerciales ofreciendo una mayor capacidad de carga con un menor consumo de combustible e impacto medioambiental.

El buque tiene una velocidad de diseño de 21 nudos, pero gracias a su flexibilidad podrá operar con efectividad en un rango de velocidades de entre menos de 10 y más de 22 nudos. Su manga de 42,5m le proporcionará una buena estabilidad mientras que su insólita manga a nivel de cubierta principal (widedeck) de 49 metros incrementará su capacidad de contenedores. Otras de sus características técnicas son:

<b>Eslora máxima</b>	272,3m
<b>Calado</b>	12m
<b>Puntal de trazado</b>	26,4m
<b>Nº de TEUs</b>	6210 TEUs
<b>Motor Principal (dual fuel)</b>	6 L
<b>Motores Auxiliares (dual fuel)</b>	9 L
<b>Potencia Instalada</b>	33 MW
<b>Potencia Propulsora</b>	23 MW
<b>Capacidad de Combustible</b>	5000m <sup>3</sup> LNG + 3000m <sup>3</sup> MDO

El diseño de los tanques laterales, con una anchura de 1m, proporcionará una gran resistencia estructural.

### 5.3 Alternativas de propulsión para buques lng con motores diesel

Los buques LNG siguen siendo el único tipo de buque que utiliza la turbina de vapor como maquinaria de propulsión, mientras que los demás tipos de buques hace décadas que abandonaron esta maquinaria ineficiente (rendimiento térmico en torno al 30 %) en favor de los motores diesel que son más eficientes (rendimiento térmico del orden del 50 %). La razón de que la industria LNG haya aceptado esta situación es la disponibilidad a bordo del buque de gas natural evaporado de los tanques de carga, y la falta de un sistema de relicuefacción que sea tan eficiente como la maquinaria que consume gas para su funcionamiento.

En general, el buque LNG ha consumido el gas evaporado, con el resultado de que el armador ha estado perdiendo unos ingresos considerables, que podría haber obtenido vendiendo el gas quemado.

Debido al uso limitado, en la actualidad sólo quedan dos empresas que diseñen y fabriquen turbinas de vapor, las japonesas Mitsubishi y Kawasaki.

Una creciente escasez de jefes y personal de máquinas con cualificación adecuada para la operación de las plantas de turbinas de vapor está dando lugar a que, a nivel mundial, la operación de los buques de vapor sea cada vez más difícil. Por otra parte, en los astilleros se presenta una situación similar ya que la experiencia en la instalación, puesta a punto y pruebas de los buques con plantas de turbinas de vapor se perdió hace décadas, desde que prácticamente todos los buques que se construyen en el mundo están propulsados por motores diesel, y hoy en día existen muy pocos astilleros en el mundo que dispongan de la experiencia suficiente.

Ante la situación expresada anteriormente y la creciente preocupación por las emisiones contaminantes, se impulsó el desarrollo de grandes buques gaseros propulsados por eficientes motores diesel, utilizando cualquiera de las siguientes alternativas:

- Una planta de propulsión con dos motores diesel lentos, que quemen fuel-oil pesado, en combinación con una planta de relicuefacción del gas evaporado, de la que se dispone de tecnología.
- Una planta de propulsión con dos motores diesel lentos, controlados electrónicamente, quemando gas o fuel-oil, en combinación con una planta de relicuefacción del gas evaporado. Con un sistema de propulsión de este tipo el usuario puede seleccionar uno de los dos tipos de combustible, dependiendo del precio relativo entre ambos.
- Una planta de propulsión con cuatro motores diesel semirrápidos, de combustible dual, y dos líneas de ejes.
- Una planta diesel eléctrica, con dos motores eléctricos propulsores alimentados con la energía eléctrica generada por cuatro grupos electrógenos, con motores diesel semirrápidos de combustible dual.

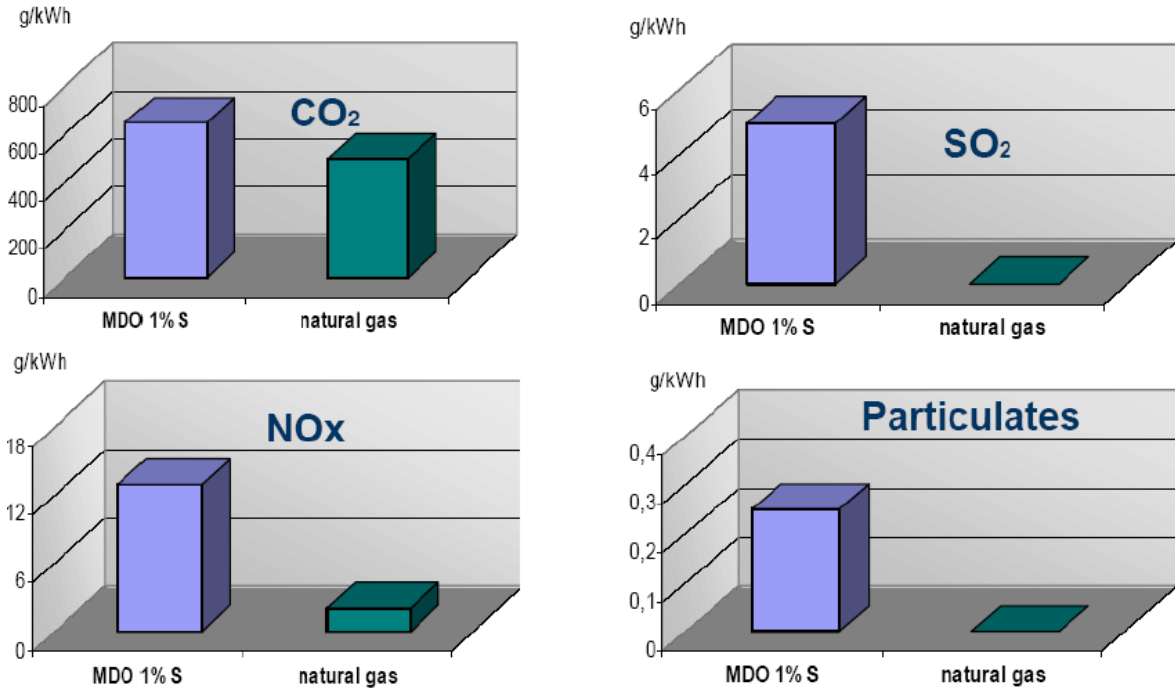
Los motores diesel de cualquier clase ofrecen beneficios económicos sobre las plantas con turbinas de vapor. El resultado de la evaluación de un proyecto

dependerá ligeramente del proyecto real, es decir, del perfil del viaje, velocidad del buque, factores económicos, precio del fuel-oil pesado y del LNG, etc. Los diseñadores de sistemas de propulsión del buque estiman que, con el cambio a una solución de propulsión con motor diesel, en la operación de un buque LNG de 138.000 m<sup>3</sup> se podría conseguir un ahorro anual del orden de 2,5 millones de euros.

También el medio ambiente se beneficiará pues los ahorros en el uso de energía para la propulsión se trasladan directamente a una emisión de CO<sub>2</sub> consecuentemente más baja. Los valores siguientes ponen de manifiesto las ventajas medioambientales del uso de gas para la propulsión de los buques mercantes tanto en navegación como durante sus estancias en puerto:

- Bajas emisiones de NO<sub>x</sub>
  - Un buque *supply* equipado con motores de gas Wärtsilä DF obtiene una reducción del 89% en las emisiones de NO<sub>x</sub> comparado con un buque diesel.
  - El ferry a gas “Gultra” midió una reducción del 75%.
- Reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>
  - El metano tiene menos carbono por cada hidrógeno que los hidrocarburos líquidos, por este motivo obtenemos reducciones en las emisiones de CO<sub>2</sub> de entre el 20% y el 25%
  - Los grandes LNG *carriers* equipados con turbinas de gas tienen un gran margen de ahorro
- Se trata de una combustión muy limpia
  - Bajas emisiones de partículas sólidas y hollín, así como de Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC) y compuestos carbonados orgánicos (TOC)
- Práctica eliminación de las emisiones de SO<sub>x</sub>
  - El Gas Natural tiene una concentración de azufre muy baja.





Comparativa entre las emisiones de un motor diesel y uno de gas.  
(Fuente: DNV: 2008. Gas Engine Propulsion in Ships. Copenhagen.)

#### 5.4 Consideraciones especiales derivadas del uso de gas natural como combustible

- **Riesgo de Explosión**
  - Como hemos comentado en el Capítulo 2, el rango de explosividad del gas natural se sitúa entre el 5% y el 15% de mezcla en aire con lo que una pequeña fuga de gas puede generar atmosferas explosivas, si bien es cierto que presenta la ventaja, con respecto a otros gases derivados del petróleo, que al ser menos denso que el aire, en caso de que estas existan son más fáciles de combatir.
  - El diseño debe contemplar conducciones de gas natural encamisadas en cualquier trazado interior además de observar toda la reglamentación vigente en relación con posibles fuentes de ignición.

- Ubicación de equipos
  - La naturaleza del combustible exige que se consideren de forma especialmente prudente la ubicación de los siguientes elementos:
    - Sala de Máquinas
    - Tanque/depósitos de almacenamiento de GNL/GNC
    - *Manifolds* de carga de combustible
    - Disposición de tuberías entre *Manifold* de carga y tanque de almacenamiento y entre éste y la máquina.
- Combustible Criogénico
  - El gas natural licuado se encuentra a una temperatura de  $-163^{\circ}\text{C}$ , por lo que todos los materiales utilizados en el conjunto gas deben ser aptos para estas temperaturas y se debe proteger el acero del barco de posibles contactos con fluido a esa temperatura.
- Alto Contenido Energético del Tanque de Almacenamiento
  - Es preciso considerar el alto poder energético del gas natural licuado. Un  $\text{m}^3$  de GNL aumenta 600 veces su volumen al pasar al estado gas y cada  $\text{m}^3$  de gas natural tiene un poder calorífico superior en torno a las 11.000 Kcal por lo que en caso de explosión la situación sería de extrema gravedad.

## 5.5 Ejemplos de sistemas propulsivos a gas

### 5.5.1 Los motores duales Wärtsilä en la propulsión de gaseros

El desarrollo de los motores diesel se ha visto impulsado por el aumento de la disponibilidad y ventajas de los combustibles gaseosos, principalmente de su nivel mucho más bajo de emisiones nocivas y de su reducido mantenimiento y mayores intervalos entre revisiones asociados con los motores alimentados con gas.

La operación con gas natural produce unas emisiones muy reducidas debido a las propiedades del combustible y su bajo contenido de contaminantes. El

metano, el principal componente, es el hidrocarburo con mejor rendimiento como combustible en términos de cantidad de energía por cantidad de carbono. Por consiguiente, trabajar con gas natural reduce las emisiones de otro contaminante principal (el dióxido de carbono) en un 20 % en comparación con el diesel.

El gas natural tiene unas características de quemado muy buenas en un motor, y debido a que es más ligero que el aire y tiene una elevada temperatura de ignición, es también un combustible seguro.

Los motores duales de cuatro tiempos de Wärtsilä pueden trabajar tanto con combustible gaseoso como líquido. Trabajando con gas, los motores trabajan de acuerdo con el ciclo Otto<sup>5</sup>, con una pre-mezcla pobre de aire y gas en la cámara de combustión. La mezcla pobre se refiere a que la mezcla tiene más aire del necesario para completar la combustión, reduciendo las temperaturas máximas. Así se produce menos NOx y se aumenta el rendimiento al aumentar la tasa de compresión y se optimizan los tiempos de la inyección. La mezcla pobre también es necesaria para prevenir la auto-ignición.

El gas se introduce dentro del cilindro por la entrada de aire durante la carrera de admisión. En vez de utilizar una bujía para la ignición - normalmente usada en motores de gas de mezcla pobre-, la mezcla se enciende inyectando una pequeña cantidad de combustible diesel en la cámara de combustión. Su elevada energía asegura la ignición fiable y potente de la mezcla, lo que se necesita cuando se trabaja con una alta potencia específica por cilindro y una mezcla de aire y gas pobre.

Para asegurar unas bajas emisiones de NOx, es esencial que la cantidad de combustible diesel inyectado sea muy pequeña. Los motores duales de Wärtsilä usan la "micro inyección", con menos de un 1 % de combustible diesel inyectado a la carga nominal, para conseguir que las emisiones de NOx sean de una décima parte de las de un motor diesel estándar.

Cuando el motor dual está trabajando con gas, la combustión debe controlarse cuidadosamente para evitar la auto-ignición o fallos en el encendido. El único modo fiable de evitar esto es, según Wärtsilä, usar un control electrónico tanto de la inyección como de la entrada

---

<sup>5</sup> Ciclo Otto modela el comportamiento de los motores de combustión interna.

de gas en cada cilindro.

La relación global aire/combustible se controla por medio de una válvula de descarga que permite que parte de los gases de escape se salten la turbina de la turbosoplante; esto asegura que la relación sea correcta independientemente del cambio de condiciones ambientales como la temperatura.

La cantidad y momento del combustible diesel inyectado se ajustan individualmente junto con la relación específica de cada cilindro y la global aire/combustible para mantener cada cilindro trabajando correctamente y dentro de los límites de la auto-ignición y el fallo de encendido. Este es un factor clave para trabajar de modo fiable con gas, ajustando automáticamente el motor de acuerdo con las condiciones cambiantes, señala Wärtsilä.

En modo diesel, el motor trabaja de acuerdo con el concepto normal diesel, usando un sistema de inyección de combustible por bomba pulsadora. El combustible diesel es inyectado a alta presión en la cámara de combustión justo antes del punto muerto superior. La admisión de gas se desactiva pero parte del combustible diesel permanece activado para asegurar una ignición fiable cuando el funcionamiento del motor pasa a ser con gas.

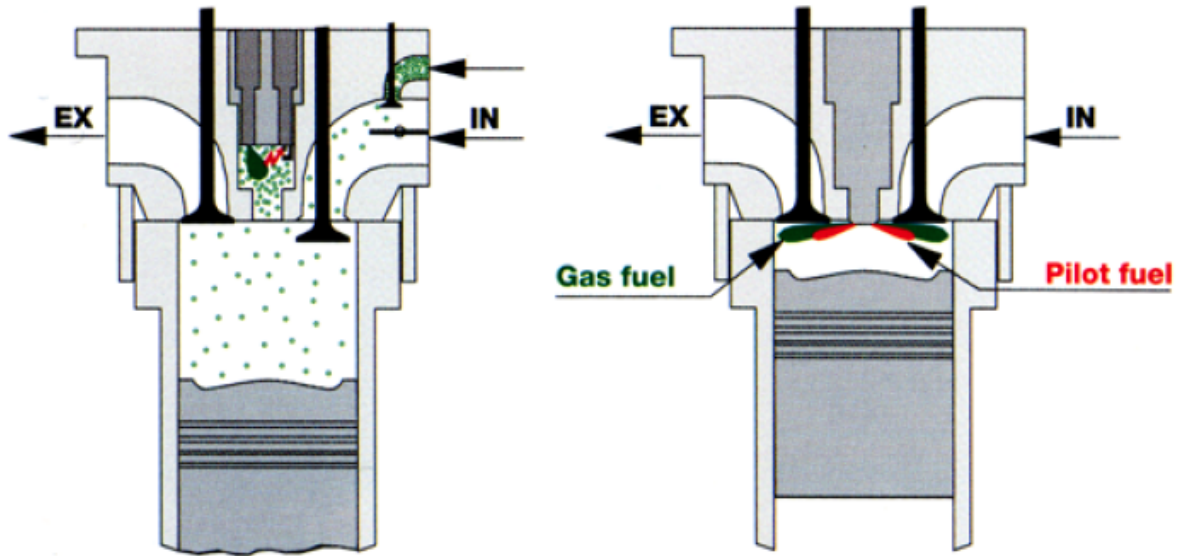
La presión del gas en el motor es de menos de 4 bar a plena carga, haciendo que el diseño de tuberías de una sola pared sea aceptable si la cámara de máquinas dispone de la ventilación y detectores de gas adecuados. La válvula de gas en cada una de las cabezas de cilindros es solenoidal y está controlada electrónicamente, con un elevado rendimiento y con grandes intervalos de mantenimiento.

El combustible piloto se introduce por medio de un sistema de raíl común, basado en una bomba de alta presión montada en el motor, que suministra el combustible a cada una de las válvulas de inyección a una presión constante de 900 bar. La válvula de inyección posee dos agujas, con la aguja del combustible piloto controlada electrónicamente por el sistema.

Los motores Wärtsilä de combustible dual pueden trabajar con gas o combustible ligero (diesel marino o gas oil) y con combustible pesado (HFO). Cuando trabajan con gas, el motor cambia automáticamente a la operación diesel si la

alimentación de gas se interrumpe u ocurre algún fallo en los componentes. El cambio necesita menos de un segundo y no tiene efectos en la velocidad del motor y la carga durante el proceso.

La transferencia entre el trabajo con diesel y gas, sin embargo, es gradual: el suministro del combustible diesel se reduce lentamente mientras que la cantidad de gas admitido se aumenta. El efecto de las variaciones de la velocidad del motor y la carga se supone mínimo.



Esquema de funcionamiento de un motor dual diesel-gas.  
(Fuente: DNV: 2008. Gas Engine Propulsion in Ships. Copenhagen.)

### 5.5.2 La aportación de Rolls-Royce a los motores de gas

Rolls-Royce ha presentado el motor Bergen B-gas que produce hasta 8,5 MW de potencia para la producción de energía eléctrica.

El nuevo motor, es el mayor producto Bergen desde que el especialista noruego empezó la construcción de unidades de potencia industrial hace cinco décadas. Se trata de un motor de velocidad media, ignición por chispa y quemado pobre que está diseñado para funcionar con gas natural. Los trabajos de diseño para el motor B-gas empezaron en la primavera de 2002; en ese momento, un operador de un motor K-gas en Dinamarca entró en conversaciones con Rolls-Royce para actualizar la potencia de su único motor. Rolls-Royce

desarrolló un nuevo motor de gas que unido a los requerimientos de los clientes siguió adelante y en agosto de 2003 firmó un contrato para la entrega del primer grupo generador B-gas.

Los ingenieros de Rolls-Royce cumplieron el plazo y el primer motor se entregó a tiempo a Tørring Kraftværk en Dinamarca. El verdadero tamaño del motor B-gas, que pesa unas 80 Tm, es sólo uno de los cambios a los que se enfrentaba Bergen cuando desarrollaron el producto. Suministradores con experiencia suficiente se encargaron de la fabricación de grandes componentes como el cárter del motor, el cigüeñal, los pistones y el turbosobrealimentador, mientras Rolls-Royce completó el diseño y ensamblaje del primer motor B-gas.

El contrato permite a Rolls-Royce ganar experiencia en este campo antes de que la fábrica entre en una actividad plenamente comercial. El motor B-gas va a explotar la creciente demanda por parte de los operadores de motores de funcionamiento alternativo que resulten rentables.

Rolls-Royce usó el motor diesel Bergen B32:40 como base y aumentó el diámetro interior de 320 mm a 350 mm con una carrera de 400 mm, convirtiéndolo en el mayor motor construido hasta la fecha por Bergen.

El control de la proporción aire/combustible del motor se maneja mediante una versión refinada del controlador de gas del motor de Bergen (GEC) KV-G4. El volumen de aire de combustión está suministrado por un turbocompresor del tipo turbina variable, pionero de Bergen para el motor KVG3 hace varios años.

El sistema de inyección de gas del motor está basado también en los principios de Bergen. Una combinación de válvula que funciona mecánicamente, comprende las válvulas de admisión y escape que se colocan en la puerta de entrada de cada cilindro. Esta combinación se sitúa para pérdidas de presión y se puede ajustar individualmente para realizar el equilibrado del motor, en base a la lectura de las válvulas indicativas del cilindro actuando en la precisión para mejorar el rendimiento y reducir las emisiones.

Aunque la plataforma de los motores está basada en la unidad B-M el resto es un diseño completamente nuevo. El bloque del motor está integrado en canales para que los fluidos y el aire se repartan en el hierro modular y se pueda utilizar en motores de gas de diámetro 350 mm y en motores diesel de 320 mm. Las



cabezas de cilindros, cigüeñal, el módulo intercambiador de aire y el sistema de escape están especialmente fabricados para el nuevo diseño.

Antes de entregar el primer motor, se probó un prototipo, el B35:40V-12, en Bergen. Los programas de validación mecánicos, térmicos, de emisión y los relacionados con el rendimiento se realizaron con muy buenos resultados. En particular, el motor se probó a más de un 20 % del régimen de potencia y los datos de las emisiones y el rendimiento fueron mejor de los esperados.

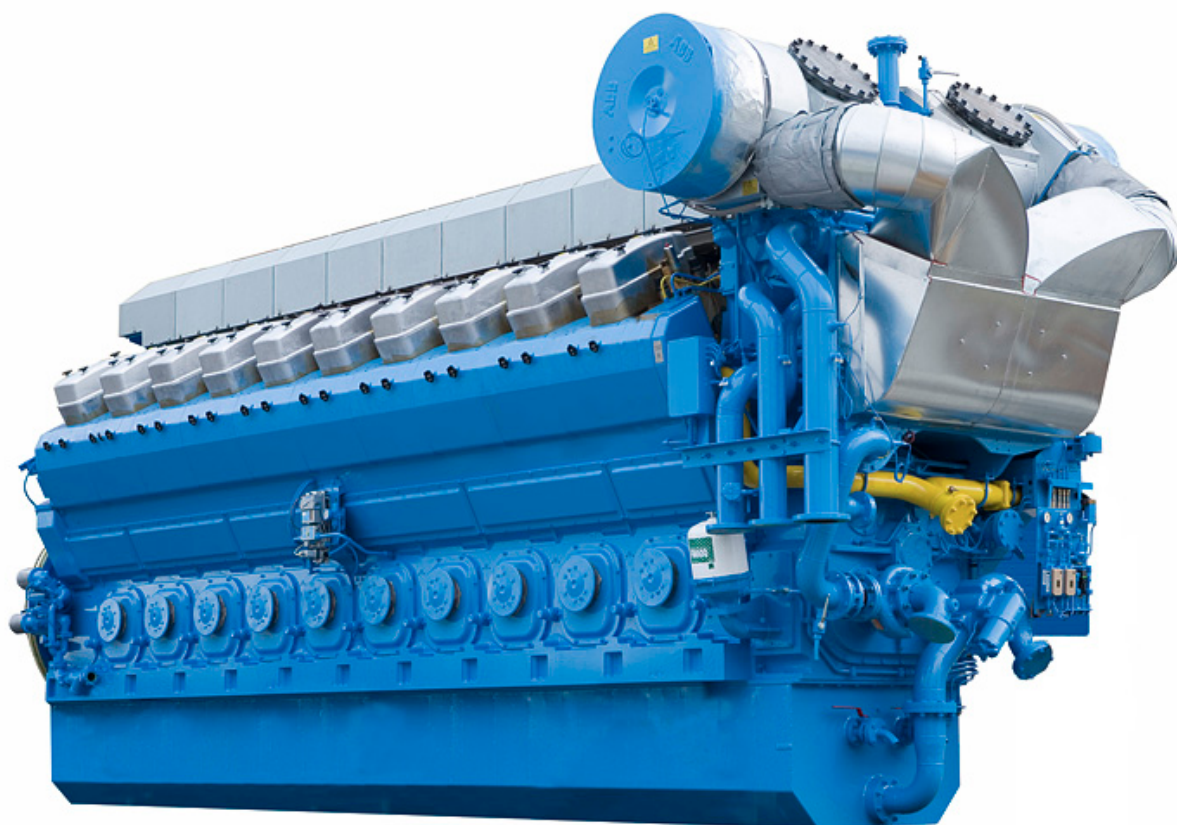


Imagen del motor Rolls-Royce a gas Bergen B35:40. (Fuente: [www.rolls-royce.com](http://www.rolls-royce.com))

Otra innovación introducida por Rolls-Royce en el sector de la propulsión marítima es la aplicación de un generador de cola híbrido. Rolls-Royce acaba de conseguir un contrato, valorado en 32 millones de dólares (unos 23,2 millones de euros), para el suministro de equipamiento de motores y propulsión marina de cuatro *ferries* propulsados por gas que serán construidos por el astillero polaco

Remontowa Shipyard para el armador noruego Torghatten Nord AS, cuya entrega está prevista para la segunda mitad del 2012.

Dichos buques serán los primeros en el mundo en incorporar un generador de cola híbrido (HSG en sus siglas inglesas), que produce energía eléctrica y reduce las emisiones y el consumo de combustible. El HSG es en realidad un sistema de control de la energía eléctrica avanzado para el acondicionamiento de dicha energía procedente del generador de cola. Permite además la disminución de la velocidad del eje, manteniendo constante la frecuencia para el suministro de electricidad al resto del buque. Este sistema permite un uso mucho más flexible del motor y de las variaciones de velocidad de la hélice para maximizar las eficiencias de ambos equipos, con el beneficio añadido de una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y NOx.

Finalmente, nombrar otras marcas como Siemens, Nigata, Man, Daewoo o Mitsubishi, que también están fuertemente implicadas en el desarrollo de modelos de máquinas y generadores auxiliares para buques basadas en el gas natural como combustible.

## **5.6 Plantas de relicuefacción del *boil-off***

Como hemos comentado con anterioridad, el uso de estos nuevos sistemas propulsivos permite reducir considerablemente el consumo de gas. Por este motivo, se hace necesaria la posibilidad de relicuar el exceso de Gas Natural Licuado que se evapora de forma natural.

Diferentes empresas como es el caso de Hamworthy, aplicaron su amplia experiencia en la relicuefacción de LPG o etileno para desarrollar la tecnología necesaria para llevar a cabo este cambio de fase en buques metaneros.

La capacidad de devolver el gas que previamente se ha relicuado a los tanques permite a los armadores y operadores de los buques elegir el sistema de propulsión óptimo para cada situación, alcanzando de esta forma objetivos largamente buscados en el mundo del transporte del gas natural licuado:

- Méritos económicos:
  - Incremento de la cantidad de carga entregada. Todo el LNG cargado puede ser entregado al cliente.

- Reducción del “HEEL” necesario en los viajes en lastre para mantener los tanques fríos.
  - Gran ahorro en la cantidad total de fuel consumido.
  - Mejora de los sistemas redundantes de propulsión.
  - Nivel de inversión competitivo
- Méritos técnicos:
- El sistema usa componentes cuya fiabilidad ha sido ampliamente demostrada.
  - El código IGC requiere que los sistemas sean 100% redundantes, lo que en nuestro caso se ofrece en dos alternativas.
  - El contenido de nitrógeno del LNG se reduce durante el viaje.
  - El sistema está prefabricado en módulos para un fácil montaje a bordo.
  - Reajuste del espacio de máquinas muy limitado.
  - El sistema tiene capacidad de control automática del 100% al 0%.
  - El sistema se puede detener cuando las bombas de carga están en operaciones.
  - No se necesita personal extra para su mantenimiento y operación.

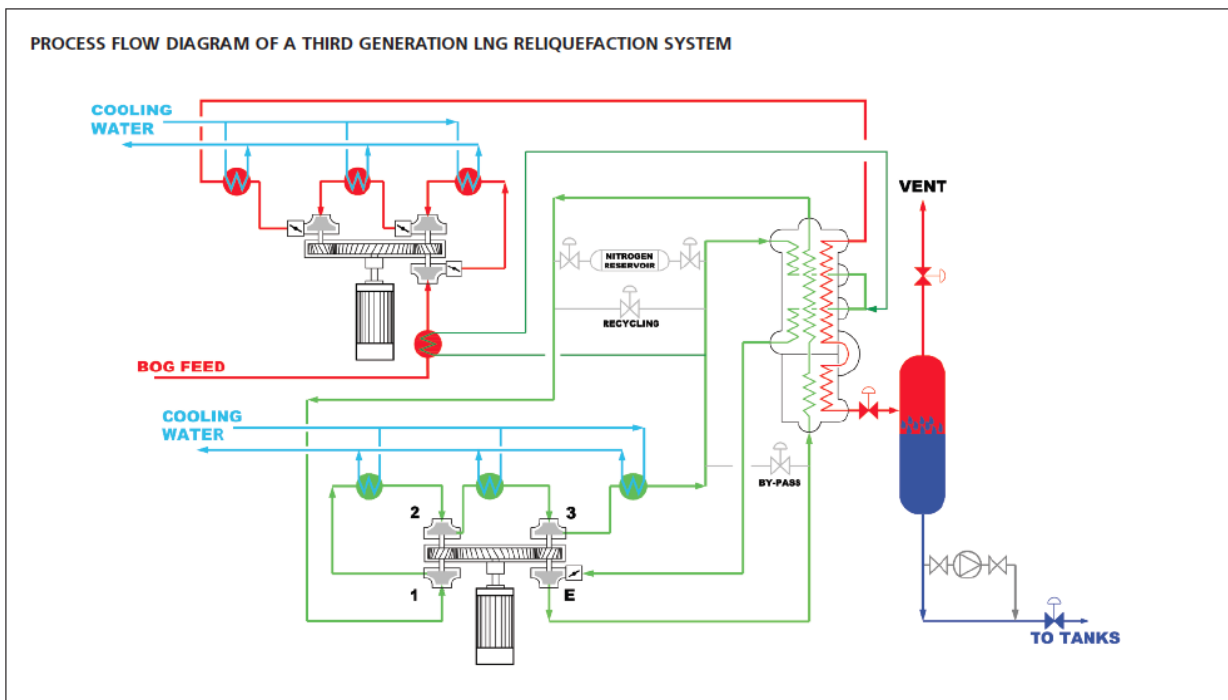


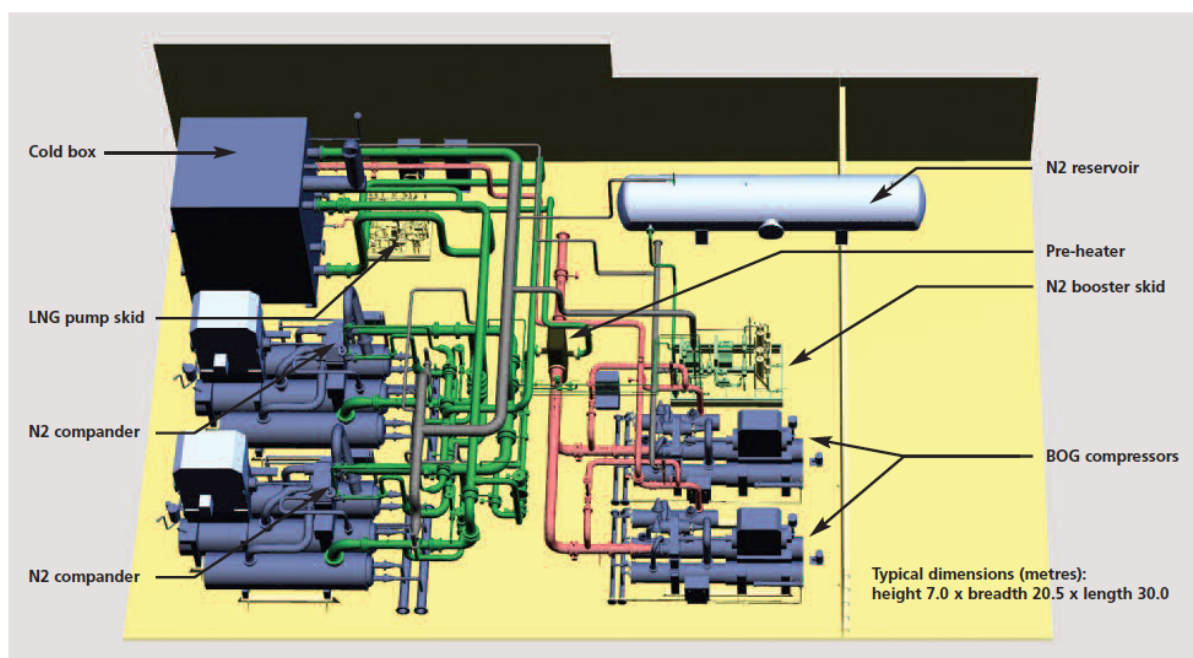
Diagrama de la tercera generación de plantas de relicuefacción de la marca Hamworthy.

(Fuente: Hamworthy, 2008: LNG Systems for Marine Application. LNG Reliquefaction & LNG Regasification)

Las plantas de relicuefacción de LNG se basan en un ciclo cerrado de expansión de nitrógeno que retira calor del *Boil-Off Gas*.

En el diagrama anterior podemos ver como el Boil-off que proviene de los tanques de carga pasa por unos compresores que lo llevan hasta una “caja fría”, donde éste condensa al encontrarse a temperatura criogénica.

Los elementos que no condensan (fundamentalmente nitrógeno) se separan del LNG condensado que es devuelto a los tanques de carga mediante un sistema basado en diferencias de presión.



Típica disposición de las plantas de relicuefacción de tercera generación de la marca Hamworthy.  
(Fuente: Hamworthy, 2008: LNG Systems for Marine Application. LNG Relicuefaction & LNG Regasification)

## 5.7 Motores auxiliares a gas

La viabilidad del objetivo de utilización de Gas Natural por parte de los buques durante su estancia en puerto pasa por la instalación en los mismos de motores auxiliares que utilicen este tipo de combustible.

Como hemos explicado anteriormente, el Gas Natural ofrece grandes ventajas como combustible, especialmente a nivel medioambiental. Por este motivo, numerosas compañías están impulsando la utilización de este tipo de

generadores. Esto viene acompañado del diseño de equipos compactos y eficientes que proporcionen suficiente electricidad al buque para el mantenimiento de toda su actividad durante la estancia en puerto.

Los buques dedicados al transporte de LNG pueden utilizar para sus motores auxiliares una parte del vapor que retornan a tierra durante las operaciones de carga o bien una fracción del que se recibe de tierra durante la descarga, de manera que no se necesitan grandes inversiones ni modificaciones a nivel de diseño de estos buques.

Por otro lado, para aquellos buques que no transporten LNG se nos plantean dos alternativas:

- Aquellos cuyo combustible principal es el LNG, únicamente deberán utilizar el gas que tienen licuado en sus tanques para alimentar a los motores auxiliares.
- Aquellos cuyo combustible principal no es el LNG deberán disponer de unos tanques dedicados al almacenamiento de esta sustancia o, si las instalaciones portuarias están preparadas para tal fin, conectarse a tierra para recibir este combustible durante su estancia en puerto.

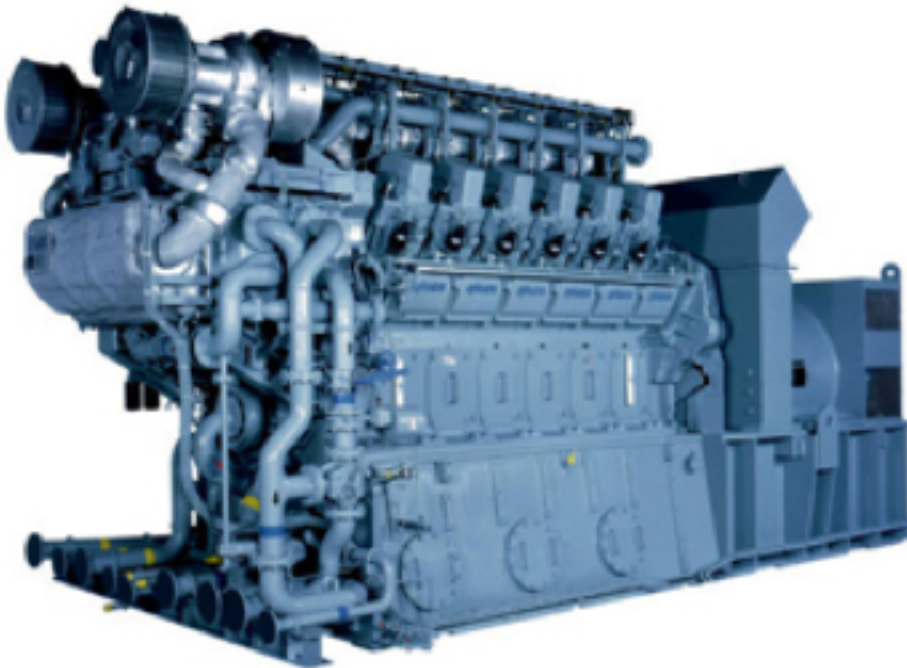
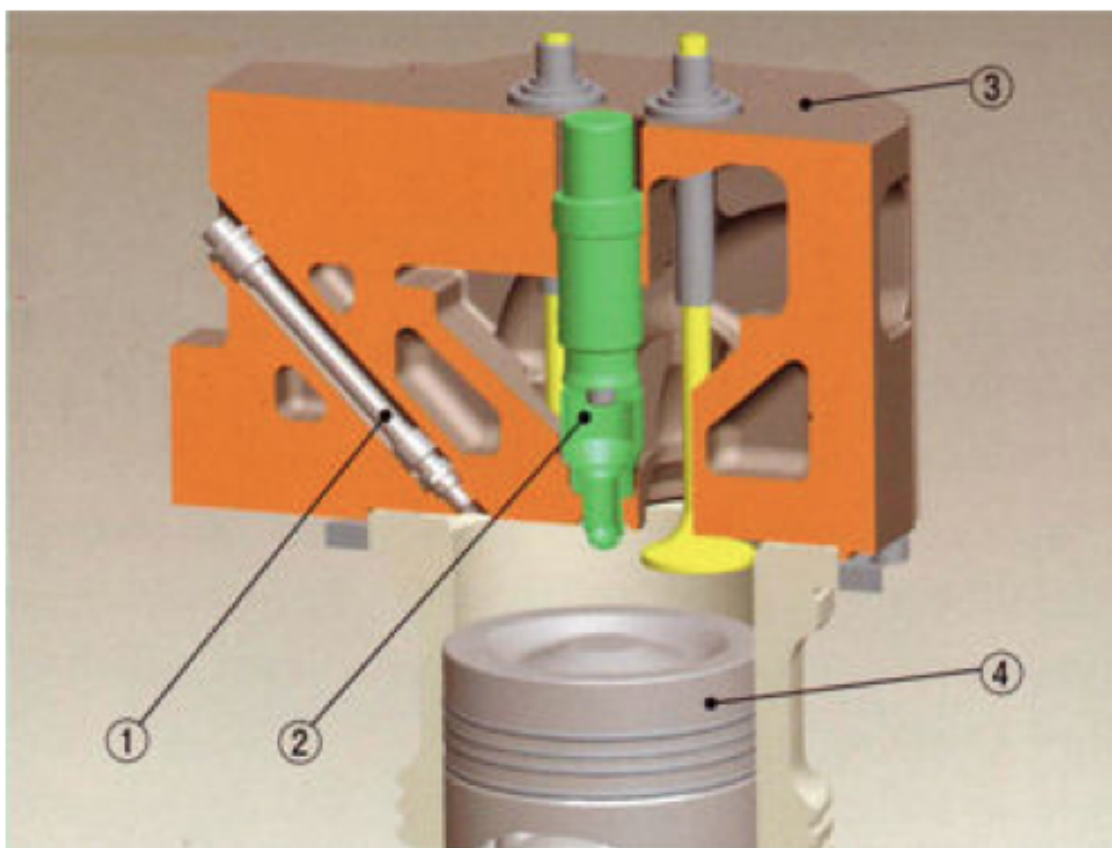


Imagen de uno de los motores de la marca Niigata que ofrece una potencia de salida de más de 3000KW.  
(Fuente: <http://www.niigata-power.com/>)

La utilización de LNG en todas las máquinas de a bordo supone otra ventaja de importancia significativa, y esta consiste en que prácticamente desaparecen las paradas de los buques en puerto para hacer *bunker*, lo que se traduce en un ahorro de tiempo y su consecuente ventaja comercial.

Para este tipo de máquina, Niigata ha desarrollado un sistema de ignición con un micro-piloto que usa una pequeña cantidad de combustible líquido (aproximadamente 1% del combustible total en conversión calorífica). El poder de ignición de este nuevo sistema es entre 5000 y 10000 mayor que el del tradicional sistema de ignición por chispa.



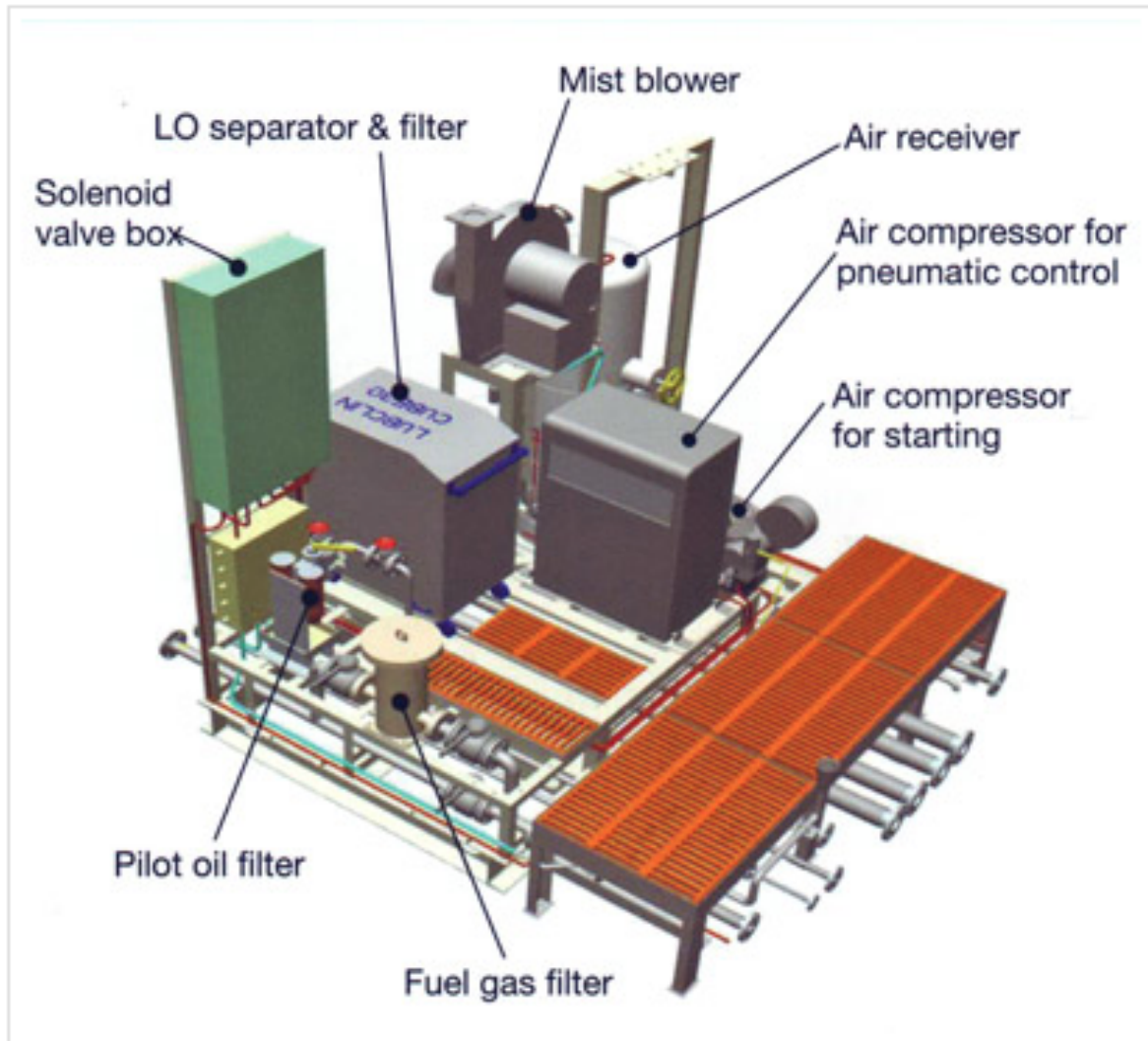
- ① Ignition plug for starting
- ② Pre-Combustion Chamber with pilot injector
- ③ Cylinder head
- ④ Main Combustion Chamber

Esquema del funcionamiento del mecanismo propuesto por Niigata. (Fuente: <http://www.niigata-power.com/>)



Otra ventaja de estos sistemas es el bajo mantenimiento que requieren, ya que éste no es necesario hasta las 4000 horas de funcionamiento y que permite el uso de Gas Natural proveniente de diferentes orígenes y cuya composición y poder calorífico puede ser significativamente diferente.

Así mismo, Niigata propone un diseño del conjunto del sistema auxiliar que permite ahorrar un 40% del espacio a bordo:



Esquema del sistema auxiliar propuesto por Niigata. (Fuente: <http://www.niigata-power.com/>)

Un paso más adelante en este sentido es el que da Rolls-Royce, en colaboración con Bergen, al presentar su generador a Gas Bergen 35:40, cuyas características principales son unas muy bajas emisiones con una producción energética y de recuperación del calor óptimas, junto con una gran fiabilidad.

Esta máquina supone una nueva generación de generadores de 720 - 750 rpm con unos estándares de emisiones de partículas, NO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub> extraordinariamente bajos.

Los dos turboalimentadores con turbinas de geometría variable permiten ajustar el flujo de aire preciso para cada cilindro en función de la posición en que se encuentre. Un gran volumen de barrido y una tecnología de combustión optimizada permite obtener la salida óptima para cada cilindro.

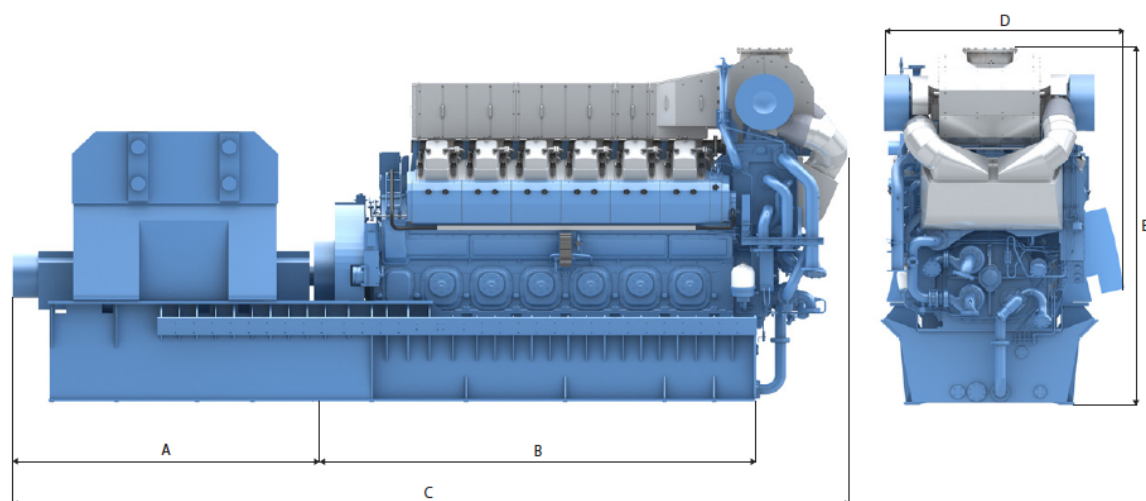
Estos motores que han sido clasificados tanto para la generación de electricidad como para la propulsión, se presentan en versiones de 12, 16 y 20 cilindros, lo que nos permite obtener unas potencias entre 5250 KW y 8750KW.

En la tabla siguiente presentamos algunos datos técnicos para las versiones V12 y V16 del generador que acabamos de describir:

Engine type		B35:40V12AG	B35:40V16AG
Number of cylinders		12	16
Engine speed	r/min	720/750	720/750
Mean piston speed	m/s	9.6/10	9.6/10
Max.cont rating	kW	5040/5250	6750/7000
Max.cont rating altern, (h=0.96)	kW	4890/5090	6520/6790
Max.cont rating altern, (Cosφ=0.8)	kVA	6110/6360	8150/8490
Mean effective pressure (BMEP)	bar	18.2	18.2
Specific energy consumption	kJ/kWh	7550/7550	7550/7550
Specific lubricating oil consumption	g/kWh	0.4	0.4
Cooling water temp. engine outlet	°C	90	90

Datos técnicos para el motor auxiliar Rolls-Royce B35:40 720/750 rpm. (Fuente: <http://www.rolls-royce.com/>)

Por otro lado, es importante destacar el reducido tamaño de estos equipos que podemos comprobar en la figura y tabla siguiente:



						Weights dry
Engine type	A	B	C	D	E	Engine
B35:40V12AG	3948	6366	10306	2712	4620	88050 kg
B35:40V16AG	3561	7947	11507	3306	4587	105580 kg

Dimensiones para los generadores V12 y V16. [Dimensiones en mm]. (Fuente: <http://www.rolls-royce.com/>)

## 5.8 Compromiso de Repsol-gas natural LNG con este nuevo tipo de buques metaneros

La flota gestionada por Repsol-Gas Natural LNG (*Stream*) se ha visto incrementada en el transcurso del año 2010 con ocho nuevos buques metaneros con capacidades de transporte comprendidas entre 153.500 m<sup>3</sup> y 173.400 m<sup>3</sup>, con lo que, a principios de 2011, esta compañía opera una flota total de 19 buques. De los ocho metaneros, siete son de nueva construcción -todos ellos construidos en astilleros de Corea del Sur- e incorporan la más alta tecnología. Prestarán servicio a Repsol e inicialmente están asignados a la planta de Perú LNG.

En el primer semestre del año 2010, el armador noruego Knutsen OAS puso a disposición de *Stream* los buques Barcelona Knutsen y Sevilla Knutsen, de 173.400 m<sup>3</sup> cada uno, con contratos a largo plazo. Construidos en el astillero Daewoo, están propulsados por un sistema dual-fuel diesel-eléctrica (DFDE), dos hélices y tienen membrana reforzada y cota ecológica.



Vista de popa del LNG/C Sevilla Knutsen. (Fuente: [www.knutsenoas.com](http://www.knutsenoas.com))

Durante el mes de julio, *Stream* incorporó el buque de nueva construcción STX Frontier, del armador noruego Hoegh, de 153.500m<sup>3</sup>, también de propulsión DFDE y contratado a medio plazo. Asimismo, incorporó el buque Maersk Methane, del armador danés Maersk, con capacidad de 165.500 m<sup>3</sup>, también a medio plazo.

En el pasado mes de agosto se incorporó a la flota gestionada por *Stream* el buque Castillo de Santisteban, propiedad de la Empresa Naviera Elcano (ENE), construido en el astillero coreano de STX. Con un contrato a largo plazo, tiene una capacidad de 173.400 m<sup>3</sup>, membrana reforzada y propulsión DFDE.

En setiembre se incorporó, también con un contrato a largo plazo, el buque Valencia Knutsen, gemelo de los buques Barcelona Knutsen y Sevilla Knutsen. Es de destacar que todos los buques de esta compañía están abanderados en España e inscritos en el Segundo Registro de Canarias, en la matrícula naval de Santa Cruz de Tenerife.

En el último trimestre del año se sumaron otros dos buques con contratos a medio plazo. Uno de ellos es el buque Ribera del Duero Knutsen, ya cerrado el

contrato con su armador, cuya incorporación se produjo a finales de 2010. Se trata de un gemelo de los tres anteriores del mismo armador.



Vista del LNG/C Ribera del Duero Knutsen. (Fuente: [www.knutsenoas.com](http://www.knutsenoas.com))

“La propulsión de esta nueva generación de buques supone la novedad más notable con respecto a la flota existente”, precisa *Stream*, “pues serán dual-fuel diesel-eléctricos. Por ello, estos buques están certificados para cumplir con las Normas Medioambientales más exigentes.”

Como hemos explicado con anterioridad, a diferencia de los LNG convencionales, generalmente propulsados por turbinas a vapor, en los buques tipo DFDE las hélices son accionadas por motores eléctricos, debido a la electricidad generada por alternadores movidos por motores diesel que pueden quemar indistintamente fuel-oil o gas natural evaporado de los tanques de carga (boil-off gas, BOG).

Este tipo de plantas tienen un rendimiento hasta un 40% superior a la propulsión a turbinas. Además, al utilizar en navegación en carga casi siempre únicamente el



gas natural que se evapora de forma natural en el interior de los tanques (BOG), se reducen adicionalmente las emisiones de CO<sub>2</sub>, y otros gases contaminantes, como los óxidos de azufre y nitrógeno. Una ventaja adicional e importante es que su ahorro de espacio en cámara de máquinas supone un aumento en la capacidad de carga.

### 5.9 Normativa de aplicación en el diseño y construcción de sistemas que contengan gas natural

Los códigos y normas de diseño que las instalaciones regasificadoras deben cumplir, así como la profesionalidad de los diferentes actores que intervienen en toda la industria del Gas Natural Licuado son los que permiten que prácticamente no se hayan registrado accidentes graves desde hace más de 40 años.

En lo referente a las plantas regasificadoras:

<b>UNE-EN 1473</b>	Instalaciones y equipos para gas natural diseño de las instalaciones terrestres
<b>UNE-EN 1474</b>	Instalaciones y equipos para gas natural licuado. Diseño y ensayo de los brazos de carga/descarga
<b>UNE-EN 1160</b>	Instalaciones y equipos para gas natural licuado. Características generales del gas natural licuado
<b>UNE-EN 1532</b>	Instalaciones y equipos para gas natural licuado. Interfaz entre buque y tierra
<b>NFPA-59 A</b>	Norma para la producción, almacenamiento y manipulación de gas natural licuado

Para el diseño y construcción de sistemas y maquinaria a gas natural para su utilización en el sector marítimo no existe una normativa de referencia de rango internacional salvo lo indicado en MARPOL.

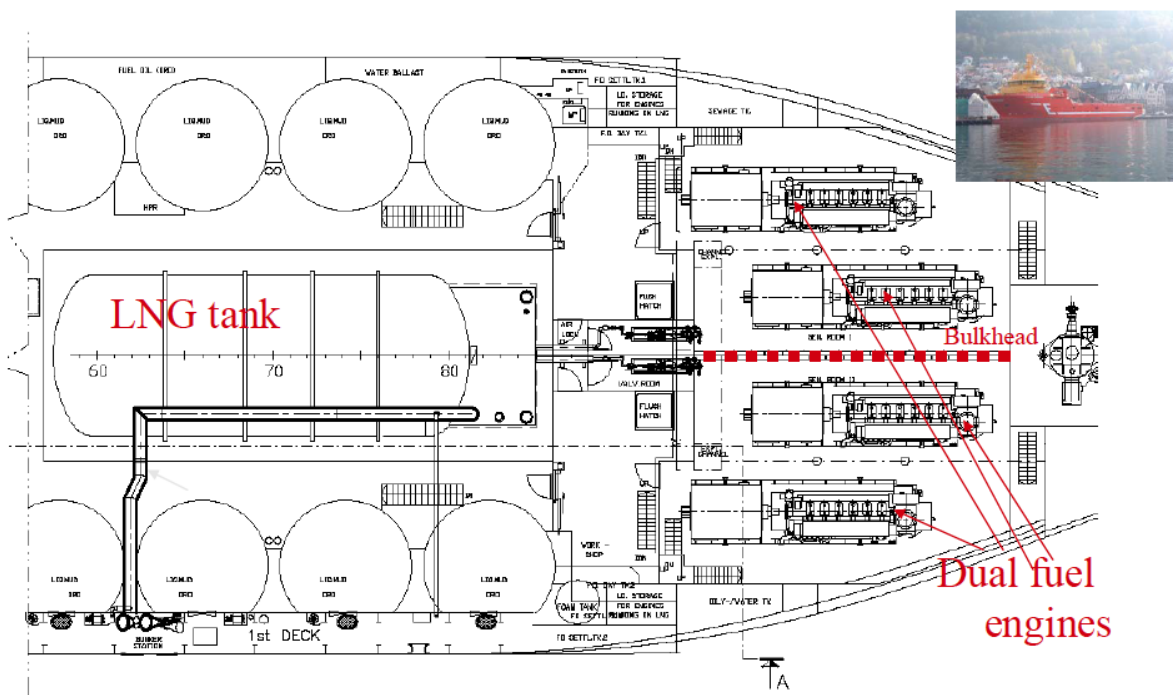
Por ello, al valorar la posibilidad de introducir esta tecnología en buques de bandera de un país concreto se deberán tener en cuenta además de las disposiciones vigentes en esta materia en el país de referencia las siguientes normas que ya han sido aplicadas en los buques actualmente en construcción u en operación a nivel mundial:



- Norma DNV – Parte 6 – Capítulo 13 “Instalaciones de gas para alimentación de Máquina” – Enero 2001.
  - Esta norma es de aplicación a cualquier tipo de buque
  - Las partes de esta norma que hacen referencia a Salas de Máquinas también son de aplicación a buques para transporte de LNG.
  - Al existir un vacío normativo a nivel internacional, la aplicación de esta norma debe ser sancionada por el país de bandera del buque, excepto en buques dedicados al transporte de LNG.
- IMO – Proyecto en desarrollo: En el seno de la Organización Marítima Internacional se están desarrollando normas que regulen la utilización de gas natural como combustible en buques de transporte. Dicha norma sigue los principios establecidos por la norma DNV.

Tanto DNV como el borrador de norma de la IMO establecen dos criterios básicos de seguridad en relación con las fugas de gas en salas de máquinas:

- Sala de Máquinas Intrínsecamente segura: aplicando el concepto de doble barrera tal y como se conoce en el código IGC. Esto es, todas las tuberías de gas en sala de máquinas y hasta la misma desde los tanques de almacenamiento van encamisadas formando un doble conducto; por el conducto interno circula el fluido y el externo dirige cualquier fuga hacia el exterior, además de estar presurizado con un gas inerte.
- Salas de Máquinas con sistema ESD (*Emergency ShutDown*): en el caso de Salas de Máquinas pequeñas donde no sea posible recurrir al encamisado de toda la tubería de gas y donde el gas natural fluya a baja presión se dota de un sistema de parada de Emergencia por detección de gas en atmosfera. El sistema es redundante exigiendo la norma DNV no menos de 3 detectores en Sala de Máquinas de forma que si uno de ellos detecta una concentración superior al 20% de L.E.L. salta la alarma de detección y si son dos los que detectan esa concentración el suministro de gas se detiene y se desconectan todos los equipos eléctricos no protegidos contra explosión.



Representación de las dos salas de máquinas independientes.  
(Fuente: DNV: 2008. Gas Engine Propulsion in Ships. Copenhagen.)

Al objeto de minimizar el impacto en la seguridad de la navegación de una caída de planta, los buques con dispositivo ESD deben de disponer de más de un motor a gas natural en salas de máquinas separadas. De esta forma, de producirse una parada de emergencia en un motor el resto de los motores seguirán funcionando.

Adicionalmente, con sistemas ESD la atmosfera de la sala de máquinas debe ser renovada 30 veces a la hora

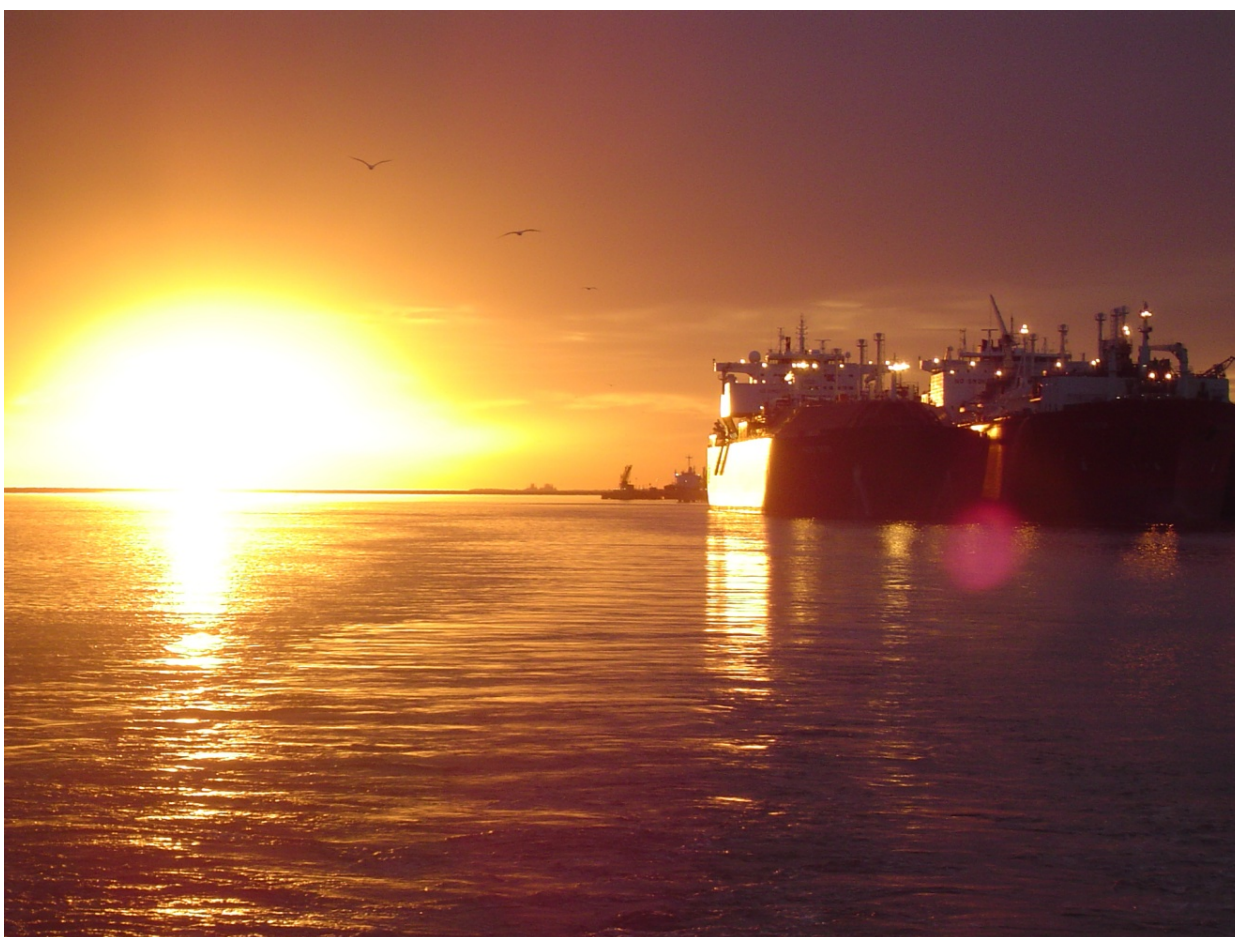
El esquema nos muestra la disposición de las salas de máquinas en un buque *Supply* en operación en el mar del norte. Se puede observar como dispone de 4 motores en salas de máquinas separadas (Sistema ESD) y un único tanque de gas natural licuado.

El sistema de almacenamiento ya se ha indicado que puede ser en la forma de gas natural comprimido (>200bar de presión) o como gas natural licuado (-163°C).

La normativa de aplicación para tanques de almacenamiento será conforme con el código IGC en caso de gas natural licuado y con las normas de aplicación en el país de bandera en el caso de gas natural comprimido.

## **CAPÍTULO 6**

### **Conclusiones**



Ocaso en Bahía Blanca (Argentina) durante la operativa de descarga Ship to Ship.  
(Fuente: Jofre Enseñat)

El cambio climático es una realidad y sus efectos ya se están dejando sentir, en particular en los países más vulnerables. Si no se frenan, los cambios del clima pueden alcanzar puntos de inflexión a partir de los cuales se generen consecuencias desastrosas e irreversibles para la humanidad. La amplia gama de efectos del cambio climático y sus posibles repercusiones en el desarrollo ponen de manifiesto la necesidad de integrar las consideraciones climáticas en la planificación y las estrategias para el desarrollo y el transporte. Así pues, se requiere una acción urgente, concertada y bien concebida en todos los niveles para controlar eficazmente las emisiones de GEI y establecer la capacidad de adaptación requerida, especialmente en los países en desarrollo.

Al igual que otros sectores económicos, el transporte marítimo, de importancia vital para el comercio globalizado, puede ayudar a afrontar este reto. Al mismo tiempo, sin embargo, debe salvaguardarse y mejorarse el acceso a unos servicios de transporte internacional sostenibles y eficientes.

En estas circunstancias, se debe promover el establecimiento de medidas políticas que promuevan el objetivo de la mitigación del cambio climático y la adaptación a éste en el transporte marítimo sin socavar las mejoras de la eficiencia del transporte y la facilitación del comercio. Debemos plantearnos un posible nuevo régimen de emisiones de GEI procedentes del transporte marítimo internacional, y ayudar a determinar las repercusiones económicas y políticas de diversas medidas de mitigación, por ejemplo la propuesta planteada en este trabajo referente al cambio de combustible de los buques hacia alternativas más sostenibles como es el Gas Natural Licuado durante la navegación de los buques o durante sus estancias en puerto.

A tal fin, y para que seamos capaces de orientar de forma correcta las decisiones políticas a tomar, debemos dirigir el debate y la investigación, entre otros, hacia los ítems siguientes:

- a) Determinar los efectos y las repercusiones en los sistemas de transporte, en particular los puertos y buques;
- b) Mejorar la comprensión de las medidas de adaptación requeridas;
- c) Estudiar las posibilidades de sinergias entre el transporte y las medidas de facilitación del comercio y la política climática, en particular en relación con la tecnología;

- d) Determinar, en líneas generales, las prácticas óptimas en lo que respecta a los mecanismos utilizados para integrar las consideraciones del cambio climático en las políticas de transporte y la planificación del uso de la tierra, así como en las decisiones sobre la inversión en infraestructura y las estrategias de desarrollo; y
- e) Determinar los actuales mecanismos de cooperación en respuesta al cambio climático entre los distintos interesados en el sector marítimo y estudiar su posible aplicación en los países en desarrollo.

Las emisiones de componentes orgánicos volátiles (VOC), durante las operaciones de manejo de cargas o en el transporte marino de las mismas, no se consideran dentro del grupo de las de mayor peligrosidad para la contaminación de la atmósfera. No obstante, el sector naval continua adoptando medidas para la reducción de este tipo de descargas.

Adicionalmente a las exigencias internacionales, la técnica tiene un conjunto de soluciones, que consideramos de gran efecto en la reducción de vapores para casos como:

- a) Mejoras del diseño del buque para un manejo adecuado de crudos de alta volatilidad en condiciones de manipulación
- b) Recuperación del *boil-off* de los buques metaneros, especialmente indicado para aquellos buques que utilizan el LNG como combustible en motores de combustión interna.

Consideramos de gran importancia la utilización de estas medidas tecnológicas, que deberán imponerse en el futuro, tanto por motivos ecológicos como por motivos económicos y operativos.

Llegados a este punto esperamos haber cumplido nuestro objetivo con la realización del presente trabajo consistente en realizar una aproximación al negocio marítimo del transporte de Gas Natural Licuado mediante la descripción general del sistema de carga de un buque gasero, así como ofrecer los elementos de juicio necesarios para poder plantearnos la conveniencia y viabilidad del establecimiento de un sistema de abastecimiento de Gas Natural a los buques durante sus estancias en puerto para que éste sea usado como combustible en

sus motores auxiliares, así como la conveniencia de impulsar los motores de combustión interna duales que pueden usar diésel y Gas Natural, por el evidente menor impacto medioambiental que estas dos medidas ofrecen.

Así mismo, creemos importante transmitir una visión positiva del futuro del negocio marítimo relacionado con el gas, ya que si bien el entorno económico actual no es favorable para prácticamente ninguna actividad económica, podemos observar como la tendencia general de este sector es al alza en las últimas décadas si bien en épocas como la actual este crecimiento se ve ligeramente ralentizado.

Nuevo equipamiento y tecnología de última generación es introducida constantemente en los nuevos buques gaseros que se construyen así como en las terminales en tierra. Algunos ejemplos son los nuevos sistemas de propulsión de que hemos hablado anteriormente, así como de las plantas de relicuado del *Boil-off* que llevan asociadas o el incremento en el tamaño de este tipo de buques.

El continuo intento de disminuir el coste del transporte del LNG impulsa el legítimo desarrollo tecnológico y a la introducción de mejoras comerciales y logísticas en el mismo. El peligro reside en que una inapropiada introducción de estas técnicas pueda revertir en un descenso de la seguridad de estos buques y de las operaciones que llevan a cabo. Debemos mantener los estándares de seguridad que son uno de los más grandes logros de este sector, registrando en la actualidad uno de los índices de accidentes más bajos de todo el negocio marítimo y orientar las mejoras tecnológicas hacia un modelo más sostenible y respetuoso con el entorno.

El éxito del LNG se fundamenta en su imagen limpia, su fiabilidad y su disponibilidad y mantener estos estándares requiere esfuerzos continuos y consistentes de todas las partes implicadas.

También queremos destacar la complejidad del mercado del LNG que se presenta de forma global, interviniendo en él un gran número de países alrededor del mundo como podemos ver en la imagen siguiente:





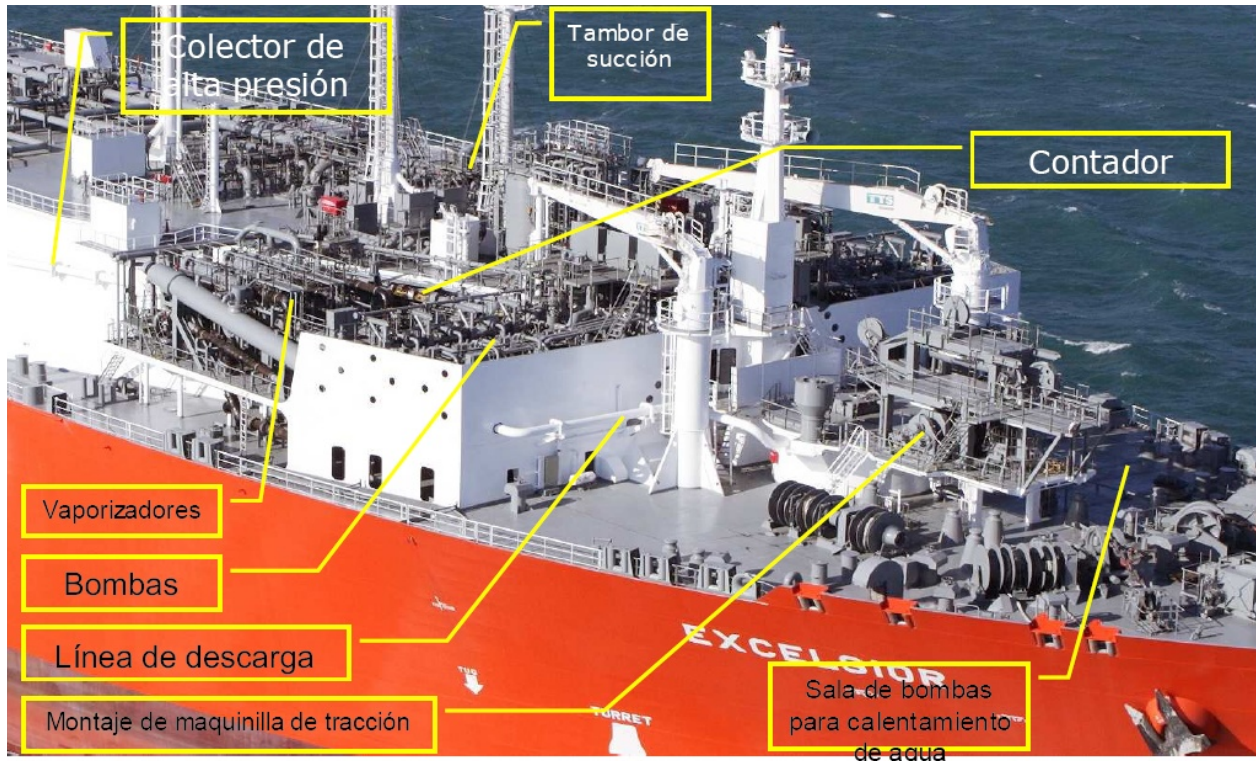
Representación de las principales rutas marítimas de LNG en el año 2010.

(Fuente: US Energy Information Administration)

También me gustaría destacar que con el desarrollo de las técnicas ship-to-ship con finalidades comerciales, cuya primera experiencia tuvo lugar en el año 2006 entre los buques LNGRV Excelsior y el LNG/C Excalibur, se ha abierto en el mundo del LNG todo un nuevo abanico de posibilidades donde muchos países sin la infraestructura necesaria para poder instalar una planta de regasificación para la recepción de LNG, pueden atracar en alguno de sus puertos un buque con planta regasificadora al que un LNG/C convencional se abarboa para descargar el contenido de sus tanques al otro buque que inicia el proceso de regasificado para posteriormente introducir el metano en fase gaseosa en la red de distribución para uso doméstico, comercial o industrial. Este es el caso de Argentina, que a pesar de tener unas grandes reservas de Gas Natural, no dispone de las infraestructuras necesarias para extraerlo y tiene en Puerto Galván (Bahía Blanca) al buque LNGRV Excelsior o al LNGRV Excelerate, atracados y listos para recibir la carga de otro buque LNG/C que se abarloe a ellos.



Operativa Ship-to-Ship entre los buques LNG/C Madrid Spirit y LNGRV Excelsior. (Fuente: Jofre Enseñat)



Planta de Regasificación del LNGRV Excelsior. (Fuente: <http://www.csocial.ulpgc.es/Foros/gas/material/9A.pdf>)

Actualmente, sabemos que más del 80% del comercio mundial se transporta por vía marítima y, aunque el combustible de los motores de los buques producen ahora entre el 1,6 y el 4,1% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono, habría que adoptar medidas para limitar los efectos del transporte marítimo sobre el cambio climático, pues las emisiones pueden triplicarse para 2050<sup>6</sup>.

Por otro lado, el perfeccionamiento del casco y del diseño de los buques, los motores, los sistemas de propulsión y medidas operacionales, como utilizar la velocidad óptima de navegación en los buques de las empresas mundiales de transporte, podrían reducir considerablemente las emisiones. No obstante, el verdadero progreso frente al cambio climático provendría de los avances que se prevén para el futuro en el uso de la energía; la coordinación de medidas para afrontar el cambio climático en los distintos sectores económicos; el intercambio de los conocimientos y la tecnología ya existentes y futura; y un estudio más profundo de la cuestión con el fin de idear más medidas eficaces.

Estas conclusiones, contenidas en resoluciones de las Naciones Unidas, nos indican que se intensifica el estudio de los efectos del Transporte Marítimo sobre el Cambio Climático y que en una natural progresión, al igual que ha ocurrido en otros sectores, las medidas correctoras de la situación actual también se irán intensificando.

Otro elemento que refuerza la importancia de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y partículas sólidas, especialmente en aquellas zonas cercanas a la costa, es que, según datos de la Agencia Europea de Medio Ambiente, 20 millones de ciudadanos europeos sufren problemas respiratorios cada día. Así mismo, el material particulado (especialmente las partículas con un diámetro inferior a 2,5 micras) se asocia con un incremento de la mortalidad por enfermedades cardiovasculares y cardiopulmonares (Pope y Dockery, 2006). También, se estima que el coste social asociado al asma es de 3 billones de euros por año y varios estudios muestran una fuerte asociación entre la exposición a la contaminación atmosférica y el agravamiento de esta enfermedad.

En general, las medidas legislativas propuestas por la Unión Europea se centran en la limitación de los contenidos de azufre de los combustibles marinos (responsables de la lluvia ácida), la potenciación del tráfico marítimo interior y en

---

<sup>6</sup> Conclusiones extraídas de la reunión de expertos en transporte marítimo pertenecientes a la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD), celebrada el 19 de Febrero de 2009.

la implantación de las “Autopistas del mar” cuyo objetivo es desarrollar las capacidades portuarias de forma que se puedan conectar mejor las regiones periféricas a escala del continente europeo e interconectar las redes de los países candidatos de la Unión Europea a las de los países integrados dentro de la misma.

Las anteriores medidas significarán un avance importante en la lucha contra el Cambio Climático y sobre todo contra la Contaminación Atmosférica pero deben acompañarse de un gran impulso en la mejora tecnológica de los buques, así como de la eficiencia de sus máquinas.

En este sentido, desde el punto de vista de la eficiencia y el ahorro energético no cabe duda de que el avance ha sido espectacular. Los ahorros de combustible derivados de las mejoras tecnológicas redundan en un inferior nivel de emisiones a la atmósfera pero los expertos coinciden en que ya no se pueden esperar incrementos notables de los rendimientos de máquina. La alternativa, al igual que ha ocurrido en el sector de la generación eléctrica, sería seguir investigando en la combinación de máquina y energía renovable. Las experiencias con velas adaptadas a buques mercantes dan ahorros que en ocasiones superan el 30% del combustible teórico aunque la aplicación de esta técnica es muy limitada.

Sin embargo, la utilización de gas natural como combustible marino frente a los derivados del petróleo, especialmente fuel-oil y gasoil se ha demostrado como una de las soluciones técnicamente viables y que puede contribuir de forma muy importante a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero utilizándose tanto en las máquinas principales como en los motores auxiliares.

La incorporación de gas natural como combustible a los barcos en puerto permitiría reducir de forma muy significativa las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y sobre todo, dada su importancia sobre entornos urbanos, eliminaría las emisiones de óxidos de azufre y partículas en suspensión responsables, entre otros, de los característicos “sombremos de contaminación” que cubren muchas de nuestras ciudades.

En la actualidad distintas compañías suministradoras de gas natural estudian la viabilidad de la instalación de plantas para el abastecimiento (*bunker*) de buques dedicados a operaciones portuarias. Las dificultades radican en la generación de

demanda suficiente en los puertos que disponen de Plantas de Almacenamiento y Regasificación de gas natural licuado.

Existe una base legislativa que tiende a regular las emisiones contaminantes de los buques y que dada la naturaleza y alcance del problema se prevé pueda endurecerse en un futuro no muy lejano. Esta normativa y la que está por venir, puede crear las condiciones necesarias para que surja una creciente demanda de gas natural para su uso como combustible en el sector del Transporte Marítimo.





## **CAPÍTULO 7**

### **Referencias bibliográficas**



Vista del Puente de Navegación del LNG/C Madrid Spirit. (Fuente: Jofre Enseñat)



## **7.1 Monografías**

- Asociación de Ingenieros Navales y Oceánicos de España, 2010: "Impacto medioambiental del sector marítimo: Emisiones Atmosféricas". Grupo de trabajo de medio ambiente y desarrollo sostenible.
- European Directive 96/82/EC: COMAH - "Control of Major Accident Hazards Regulations".
- Ffooks, Roger. 1993: "Natural Gas by Sea". Witherby & Co. Ltd.
- Hamworthy, 2008: "LNG Systems for Marine Application. LNG Reliquefaction & LNG Regasification".
- ICS, 1991: "Safety in Liquefied Gas Tankers".
- ICS/OCIMF/SIGTTO, 1995: "Ship-to-Ship Transfer Guide (Liquefied Gases)".
- ICS, 1996: "Tanker Safety Guide (Liquefied Gas)".
- ICS/OCIMF/SIGTTO, 1999: "A Guide to Contingency Planning for the Gas Carrier Alongside and Within Port Limits".
- ICS/OCIMF/SIGTTO, 1999: "A Guide to Contingency Planning for Marine Terminals Handling Liquefied Gases in Bulk".
- ICS/OCIMF/SIGTTO, 2000: "Contingency Planning and Crew Response Guide for Gas Carrier Damage at Sea and in Port Approaches".
- ICS/OCIMF/IAPH, 1995: "International Safety Guide for Oil Tankers and Terminal".
- Organización Marítima Internacional, 1993: "International code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code)".
- Organización Marítima Internacional, 1980: "Code for the Existing Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk", 1976 y suplemento de 1980.
- Organización Marítima Internacional, 1992: "International Convention for the Safety of Life at Sea 1974, 1992. (SOLAS)". Enmendado hasta la fecha.
- Organización Marítima Internacional, 1998: "International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL) 73/78".
- Organización Marítima Internacional, 1995: "International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, 1978".
- Organización Marítima Internacional, 1995: "Recommendations on the Safe Transport, Handling and Storage of Dangerous Substances in Port".
- Organización Marítima Internacional, 1991: "Medical First Aid Guide for Use in Accidents involving Dangerous Goods (MFAG)".

- Organización Marítima Internacional, 1991: "Model Course 1.05 – Liquefied Gas Tanker Familiarisation".
- Organización Marítima Internacional, 1991: "Model Course 1.06 – Advanced Training Programme on Liquefied Gas Tanker Operations".
- Pope, C., Dockery, D., 2006: "Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. Air & Waste Management Association". ISSN 1047-3289. Nº 56, págs.: 709-742.
- SIGGTO, 2000: "Liquefied Gas Handling Principles on Ships and in Terminals". Tercera Edición.
- SIGGTO, 1992: "Guidelines for Hazard Analysis as an Aid to Management of Safe Operations".
- SIGTTO/ICS/OCIMF, 1995: "Ship to Ship Transfer Guide (Liquefied Gases)".
- OCIMF, 1993: "Safety Guide for Terminals Handling Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk".
- SIGTTO, 1982: "Safe Heavens for Disabled Gas Carriers. A Consultative Document in the Seeking and Grating of a Safe Heaven".
- Teekay Shipping Co. 2004: "Madrid Spirit Bridge Book".
- Teekay Shipping Co. 2004: "Madrid Spirit Cargo Book".
- Teekay Shipping Co. 2004: "Madrid Spirit Machinery Book".
- Vaudolon, Alain. 2000: "Liquefied Gases, Marine Transportation and Storage". Witherby Publishers.

## 7.2 Referencias on-line

[www.sigtto.org](http://www.sigtto.org)

<https://www.cia.gov>

[http://www.oxfordprinceton.com/pdf/ieca\\_presentation.pdf](http://www.oxfordprinceton.com/pdf/ieca_presentation.pdf)

[http://www.icfi.com/markets/energy/doc\\_files/lng-market-analysis.pdf](http://www.icfi.com/markets/energy/doc_files/lng-market-analysis.pdf)

[http://www.intertanko.com/upload/presentations/LNG\\_NobleP.pdf](http://www.intertanko.com/upload/presentations/LNG_NobleP.pdf)

<http://www.exmar.be/PDF/profile%20Oct%20'08.pdf>

<http://astrochemistry.org/H2OCH4.html>

[http://www.rkiinstruments.com/pdf/manual\\_gx2001\\_spanish.pdf](http://www.rkiinstruments.com/pdf/manual_gx2001_spanish.pdf)

<http://kuadritoscom.blogspot.com/2010/05/atomo-de-carbono.html>

<http://www.witherbyseamanship.com/category/GasBoats.htm>

<http://www.osclimited.com/lngtO2020/brochure.pdf>

<http://www.nfpa.org/>

<http://www.cryostar.com/web/lng-tanker-carrier-equipmt.php>

<http://www.lngunlimited.com/>  
<http://www.oxfordenergy.org/pdfs/NG5.pdf>  
[http://www.eia.doe.gov/oil\\_gas/natural\\_gas/info\\_glance/natural\\_gas.html](http://www.eia.doe.gov/oil_gas/natural_gas/info_glance/natural_gas.html)  
<http://www.icis.com/Articles/2010/01/04/9322467/global-lng-market-to-impact-us-natural-gas-market.html>  
<http://www.csocial.ulpgc.es/Foros/gas/material/9A.pdf>  
<http://www.marinelink.com/news/article/exmar-orders-fourth-lng-rv/316339.aspx>  
<https://www.cia.gov/library/publications/>  
<http://www.eea.europa.eu/themes/air>  
<http://www.mityc.es/>  
[http://www.unctad.org/sp/docs/cimem1d2\\_sp.pdf](http://www.unctad.org/sp/docs/cimem1d2_sp.pdf)  
<http://www.aeee.es/>  
[http://www.cne.es/cne/contenido.jsp?id\\_nodo=82&&keyword=&auditoria=F](http://www.cne.es/cne/contenido.jsp?id_nodo=82&&keyword=&auditoria=F)  
<http://www.ecomarinepower.com/>  
[http://www.ecologistasenaccion.org/article.php?id\\_article=5681](http://www.ecologistasenaccion.org/article.php?id_article=5681)  
[http://www.navarra.es/home\\_es/Temas/Medio+Ambiente/Calidad+del+aire/Informacion/Efectos+globales/Contaminacion+atmosferica.htm](http://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Calidad+del+aire/Informacion/Efectos+globales/Contaminacion+atmosferica.htm)  
<http://www.mityc.es/energia/gas/Gas/Paginas/gasnatural.aspx>  
[http://www.enagas.es/cs/Satellite?cid=1142417697953&language=es&pagename=ENAGAS/Page/ENAG\\_mapaInfraestructuras](http://www.enagas.es/cs/Satellite?cid=1142417697953&language=es&pagename=ENAGAS/Page/ENAG_mapaInfraestructuras)  
<http://www.bi.no/ShippingakademietFiles/IBC/Presentations/Thursday/Torill%20Grimestad%20Osberg.pdf>  
<http://www.ingenierosnavales.com/DOCUMENTACIONFOROS/FOROS-Documento%20anexo%20Emisiones%20atmosféricas.pdf>  
<http://saferenvironment.wordpress.com/2008/10/04/marine-pollution---degradation-mitigation-management-is-essential-for-improving-marine-environment/>  
<http://delacontecerportuario.wordpress.com/>  
<http://repuestosbarcos.blogspot.com/>  
<http://www.ingenierosnavales.com/>  
<http://www.infomarine.com/>  
<http://www.offshore-technology.com/projects/magnus/magnus4.html>  
<http://www.progener.es/mitgas.htm>  
<http://www.rolls-royce.com/marine/products/>  
<http://civilgeeks.com/?p=4160>  
<http://www.hamworthy.com/>  
<http://www.niigata-power.com/>